BIBLIOTECA DI SCIENZE FISICHE
MATEMATICHE E NATURALI

LEANDRO SEGALIN

FISICA SPERIMENTALE

AD USO DELL'ISTITUTO TECNICO PER GEOMETRI

VOLUME PRIMO

PROGRAMMI 15 MAGGIO 1933-XI

G. B. PARAVIA & C.

LEANDRO SEGALIN

FISICA SPERIMENTALE

AD USO

DELL'ISTITUTO TECNICO PER GEOMETRI

VOLUME PRIMO

PROGRAMMI 15 MAGGIO 1933 - XI

G. B. PARAVIA & C.

TORINO - MILANO - FIRENZE - ROMA - NAPOLI - PALERMO

PROPRIETÀ LETTERARIA

Printed in Italy.

Soc. An. G. B. Paravia & C.
Torino — Corso Vittorio Emanuele II, 199.
789 (*B*) 1933 - 13560 [17108]

INTRODUZIONE

1. Esempi di fenomeni fisici. — Nella scienza è detto *fenomeno* qualunque cambiamento che avviene nei corpi, o nelle loro mutue relazioni. La caduta di una semplice goccia d'acqua, o un avvenimento eccezionale, come un terremoto, un'eclisse, o simili, sono fenomeni.

Ci son dei fenomeni che non lasciano alterazioni profonde nei corpi, in modo che questi possono essere riportati al loro stato iniziale con semplici operazioni, azioni meccaniche, riscaldamento o raffreddamento, compressione, ecc. Tali sono la caduta di un corpo, che con semplice azione meccanica si può riportare nella posizione di partenza; l'ebollizione, durante la quale un liquido passa allo stato di vapore, ma il vapore con semplice raffreddamento può ritornare allo stato liquido. Sono questi i *fenomeni fisici*. Invece altre specie di fenomeni lasciano alterazioni profonde, sì che i corpi possono ritornare al loro stato iniziale solo con operazioni laboriose, complicate e costose. Questo si verifica, ad esempio, nella combustione del legno, del carbone, ecc., nell'irrugginirsi di un pezzo di ferro lasciato all'aria umida. Sono questi i *fenomeni chimici*.

La scienza, che è scesa a scrutare con felici risultati l'intima natura dei corpi, pone oggi fra le due categorie di fenomeni esposte, i *fenomeni fisico-chimici*, che partecipano dei caratteri

degli uni e degli altri. Le soluzioni, l'elettrolisi, ecc., sono fenomeni fisico-chimici.

2. Rappresentazioni grafiche. — Durante lo svolgimento d'un fenomeno ci sono delle grandezze che variano insieme. Così, per citare qualche esempio, nella dilatazione, o restrizione, che subisce una sbarra di metallo quando viene riscaldata, o raffreddata, variano le grandezze temperatura e lunghezza della sbarra. È logico, anzi è questo lo scopo principale dello studio sperimentale, che lo scienziato investighi se fra le grandezze citate esista una relazione. In tal fenomeno infatti si riscontra che con una grande approssimazione *la variazione di lunghezza subìta dalla sbarra è proporzionale alla variazione di temperatura.* Altro esempio: ognun sa che il moto di un corpo si accelera durante la caduta; ora i fisici con uno studio accurato del fenomeno hanno trovato che se il corpo cade nel vuoto *l'altezza da cui scende, o, come si dice, lo spazio percorso, è proporzionale al quadrato del tempo impiegato.* Per specificare: un corpo cadente nel vuoto scende nel 1° secondo da 5 m. circa; in 2 secondi da $2^2 \times 5 = 20$ m.; in 3 secondi da $3^2 \times 5 = 45$ m.;... in 10 secondi da $10^2 \times 5 = 500$ m.

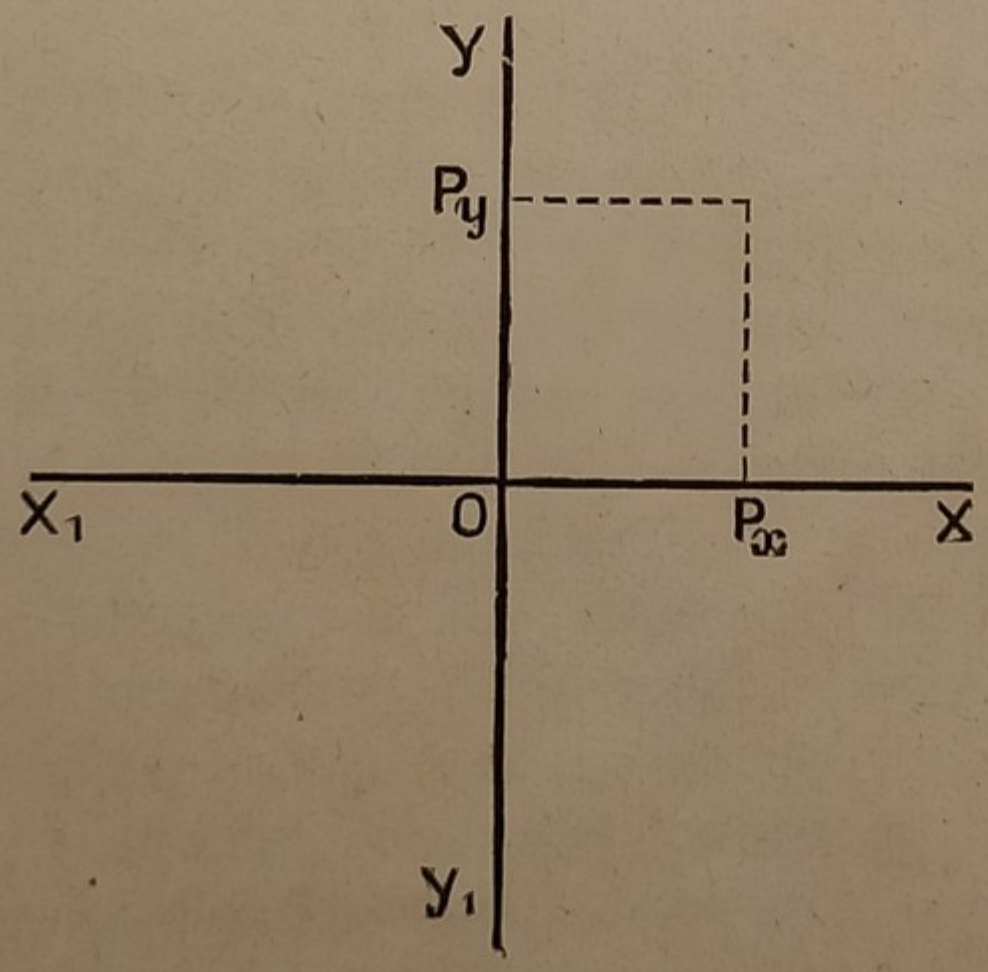

Fig. 1.

Ma molti fenomeni hanno uno svolgimento più complicato e non è possibile enunciare la *legge*, ossia la relazione numerica fra le grandezze che nel fenomeno variano insieme; un esempio ci è offerto dalla dilatazione dell'acqua. In tali casi i risultati sperimentali ottenuti si raccolgono in *tabelle numeriche*, come quella sottostante, compilata in base alle determinazioni del Prof. Rossetti dell'Università di Padova. I numeri della prima colonna indicano i valori della tempe-

ratura e quelli della seconda i valori corrispondenti del volume di 1 grammo d'acqua misurato in cm^3.

Temperatura in centigradi	Volume in centimetri cubi	Temperatura in centigradi	Volume in centimetri cubi	Temperatura in centigradi	Volume in centimetri cubi
— 10°	1,001858	3°	1,000008	20°	1,001773
— 9	1,001575	4	1,000000	25	1,002938
— 8	1,001317	5	1,000008	30	1,004346
— 7	1,001089	6	1,000032	35	1,005978
— 6	1,000883	7	1,000071	40	1,007820
— 5	1,000702	8	1,000124	45	1,009850
— 4	1,000545	9	1,000192	50	1,012070
— 3	1,000410	10	1,000273	60	1,017050
— 2	1,000297	12	1,000476	70	1,022700
— 1	1,000203	14	1,000729	80	1,028990
0	1,000132	16	1,001031	90	1,035900
1	1,000073	18	1,001380	100	1,043430
2	1,000032				

In tutti i casi però è sempre possibile dare del fenomeno una *rappresentazione grafica*, che offre del fenomeno una visione completa e immediata.

Per un punto di un piano si traccino due rette perpendicolari passanti per un punto O detto *origine*. Delle due rette chiamiamo la X_1OX, *asse delle ascisse*, la YOY_1, *asse delle ordinate*. Per un punto P del piano tiriamo le perpendicolari agli assi, i quali siano da esse incontrate nei punti P_x e P_y (fig. 1). Il numero relativo x che misura OP_x è detto *ascissa*, quello y che misura OP_y *ordinata*. Con ciò ad ogni punto P del piano corrisponde una coppia di numeri x e y, ossia una coppia di *coordinate*.

I punti interni all'angolo retto formato dai semiassi positivi OX, OY hanno ambedue le coordinate positive e quelli interni all'angolo opposto al vertice X_1OY_1 ambedue le coordinate negative. I punti interni all'angolo XOY_1 formato dal semiasse positivo delle ascisse e dal semiasse negativo delle ordinate hanno l'ascissa x positiva, e l'ordinata y negativa; quelli dell'angolo YOX_1 opposto al vertice hanno la x negativa e la y positiva.

Si abbiano ora due grandezze A e B fra le quali esista una legge di dipendenza, o, come dicono i matematici, la A sia *funzione* della B che è detta *variabile*. Supponiamo che l'esperienza ci abbia date le due serie corrispondenti di valori a_1, a_2, a_3,...; b_1, b_2, b_3,... delle grandezze A e B. Allora segniamo i punti del piano P_1, P_2, P_3,... aventi per coordinate le coppie a_1b_1, a_2b_2, a_3b_3... Se sarà il caso, si segneranno anche altri punti intermedi, e si traccerà la linea che li comprende. Questa linea è detta *diagramma* del fenomeno.

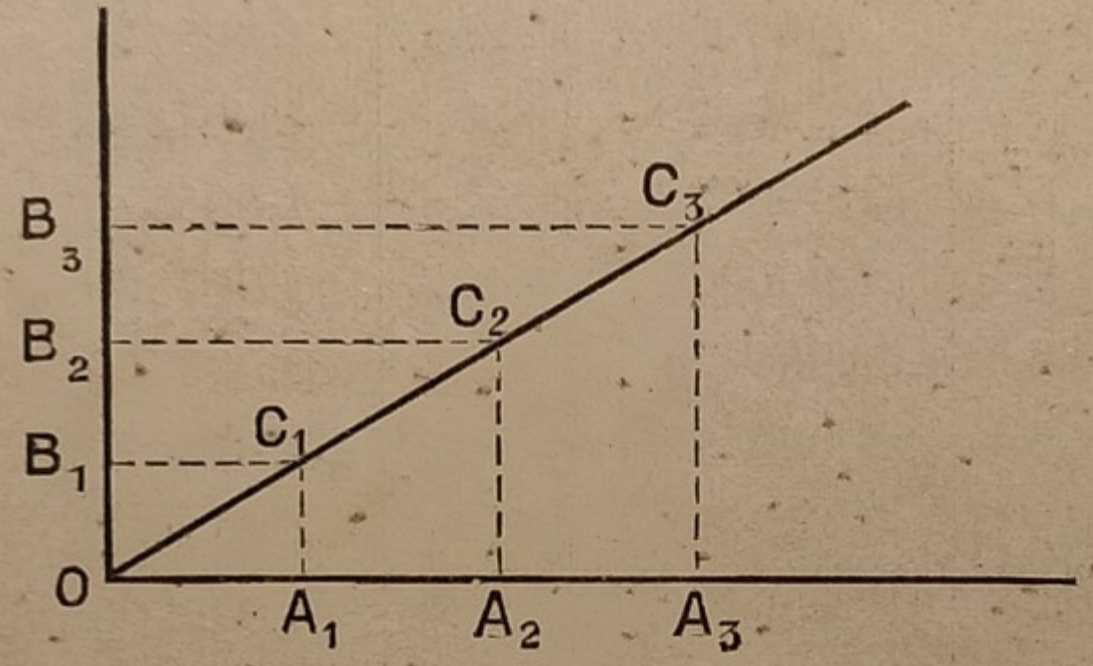

Fig. 2.

Così operando per la dilatazione della sbarra, OA_1, OA_2, OA_3... (fig. 2) rappresentano degli intervalli di temperatura, per esempio, da 0° a 10°, da 10° a 20°, da 20° a 30°,... e OB_1, OB_2, OB_3,... rappresentano i corrispondenti allungamenti subìti dalla sbarra, che, come si sa, sono proporzionali alle variazioni della temperatura. I punti ottenuti C_1, C_2, C_3,... sono manifestamente sopra una retta OZ.

Nella figura 3 è rappresentato il moto di caduta di un corpo pesante nel vuoto: OA_1, OA_2, OA_3,... rappresentano i tempi, 1, 2, 3... secondi; OB_1, OB_2, OB_3,... che stanno fra loro, per la legge sopra enunciata, come 1 : 4 : 9 : ... rappresentano i rispettivi spazi percorsi. I punti C_1, C_2, C_3,... stanno sopra una curva OZ (parabola). Negli esempi citati le due grandezze hanno sempre

valori positivi, quindi la curva si trova tutta nell'angolo retto formato dai due semiassi positivi, ma può avvenire che esse acquistino anche valori negativi, nel qual caso la curva passa in altri angoli. Un esempio notevole lo troviamo nella rappresentazione grafica del moto oscillatorio (7).

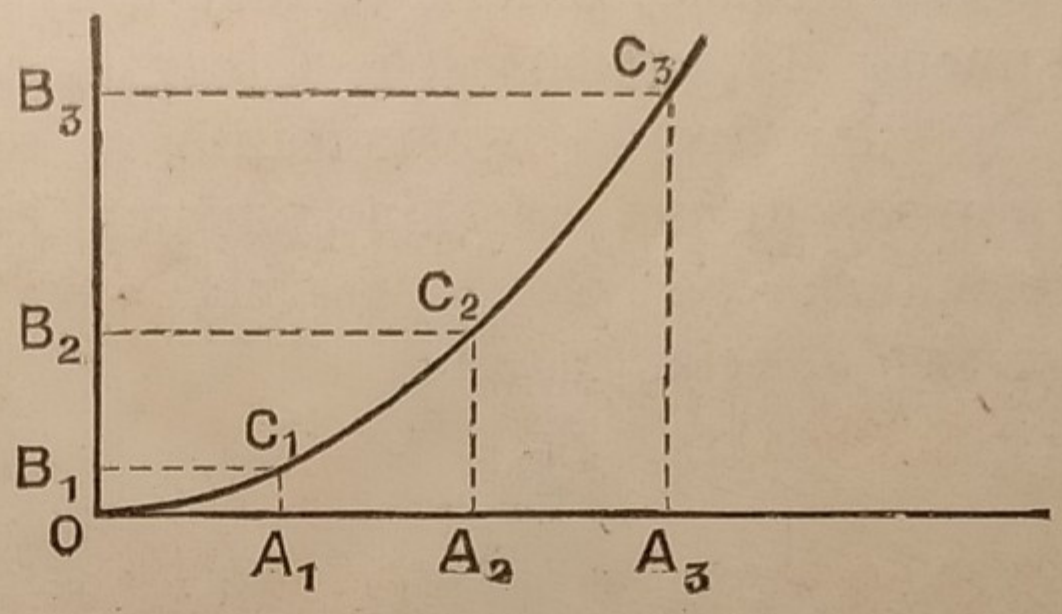

Fig. 3.

3. Stati di aggregazione. — I corpi *solidi*, quali il legno, il marmo, il ferro, ecc., hanno una *forma determinata* e oppongono notevole resistenza a un cambiamento di forma. Si ammette che le loro molecole siano legate mutuamente da una forza detta *coesione*, molto grande: infatti per rompere un filo d'acciaio della sezione di 1^{mm^2} occorre una forza di trazione di circa 70 kg.

Fig. 4.

I corpi *liquidi*, quali l'acqua, l'alcool, il vino, hanno le loro particelle che scorrono facilmente le une sulle altre e *non hanno una forma propria*; ricevono la forma del recipiente. Sono anche caratterizzati dalla proprietà di essere *pochissimo compressibili* e sono *perfettamente elastici*.

I *gas* o *aeriformi* hanno molecole mobilissime e *apparentemente* senza coesione; sono *molto compressibili* ed *elastici perfetti*.

La loro compressibilità si dimostra coll'apparecchio della figura 4, detto acciarino pneumatico per la ragione che si vedrà nella Termologia. Uno stantuffo di cuoio ingrassato è impegnato in un tubo di vetro, chiuso in basso, a pareti robuste. Premendo sullo stantuffo questo si affonda nel tubo; l'aria sottostante vien compressa, e ridotta a una piccola frazione del volume primitivo; allentando la pressione l'aria riprende il primitivo volume e caccia in alto lo stantuffo.

Si dice comunemente che i gas sono anche dotati di espansione o di *espandibilità*, cioè hanno la proprietà di aumentare indefinitamente il loro volume e di occupare sempre completamente il recipiente che li contiene.

Si dimostra la espandibilità di un gas ponendo sotto la campana di una macchina pneumatica (fig. 5) una vescica contenente un po' d'aria, che nelle condizioni ordinarie lascia la vescica floscia. Facendo il vuoto nella campana, cioè dimi-

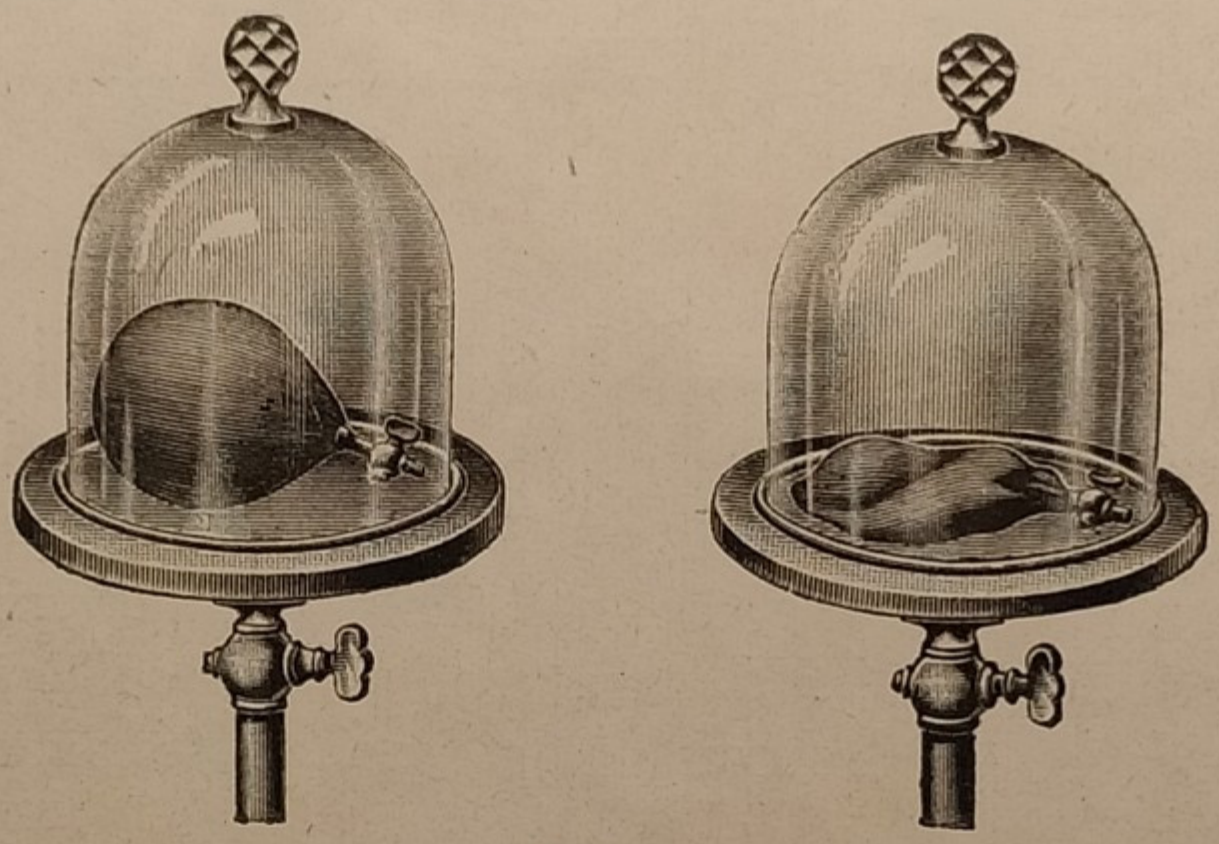

Fig. 5.

nuendo la pressione che l'aria della campana esercita sulla vescica, questa si gonfia per l'espansione dell'aria interna. Fatta rientrar l'aria nella campana, la vescica si affloscia di nuovo in causa del sopravvenuto aumento di pressione.

Uno stesso corpo, pur conservando la sua natura chimica, può presentarsi sotto i tre stati: lo zolfo, che d'ordinario è solido, riscaldato diventa liquido, e riscaldato ancor più, bolle e si converte in vapore; così l'acqua, che vediamo comunemente liquida, non di rado la si ha allo stato di ghiaccio o di vapore. L'aria stessa, convenientemente raffreddata, diventa liquida e anche solida.

4. Proprietà generali della materia. — Sono proprietà generali a tutti i corpi; ci limiteremo a dire brevemente delle seguenti:

a) ESTENSIONE. — Ogni corpo è esteso, cioè occupa una porzione di spazio, che si chiama il suo *volume*. Ma oltre il

volume occorre spesso considerare l'estensione di un corpo in *lunghezza* e in *superficie*. L'unità fondamentale per la misura delle dimensioni di un corpo è il *metro*, che, a parte la sua origine, è la lunghezza che, a zero gradi di temperatura, hanno delle sbarre formate con una lega di platino e iridio, che si trovano nell'Ufficio internazionale di Pesi e Misure di Sèvres. Le sbarre hanno un profilo ad X (fig. 6) per conciliare la leggerezza con la rigidità. Sono noti i multipli e sottomultipli usuali del metro; meno noti i seguenti sottomultipli: il *micron* = 1 millesimo di millimetro e il *micromillimetro* = 1 milionesimo di millimetro. Questi sottomultipli hanno rispettivamente i simboli μ e $m\mu$. Si usano per la misura di lunghezze estremamente piccole, come le lunghezze d'onda nell'ottica.

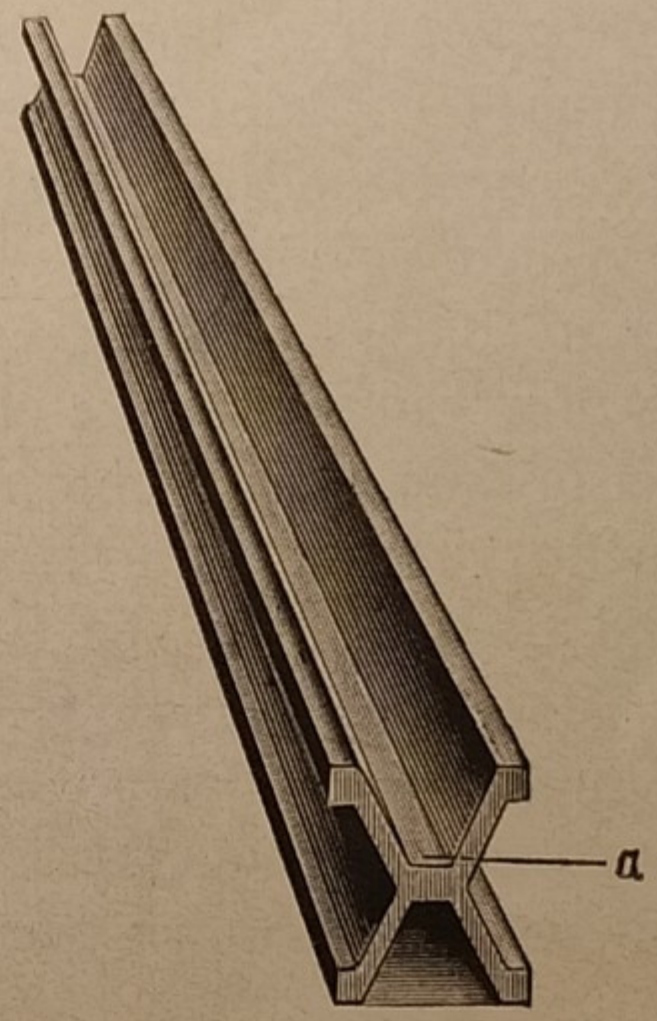

Fig. 6.

Per le superficie e per i volumi si usano corrispondentemente il metro quadrato (m^2) e il metro cubo (m^3) coi rispettivi multipli e sottomultipli.

Nella fisica, come si vedrà, le unità sono il centimetro lineare (cm), il centimetro quadrato (cm^2) e il centimetro cubo (cm^3).

b) Divisibilità. — Un corpo può esser diviso in particelle piccolissime; ciò apparisce in molte polveri dette impalpabili; l'oro può ridursi in foglie dello spessore inferiore a $^1/_{50}$ di micron; qualche milligrammo di fucsina colora in rosso parecchi litri d'acqua; le sostanze odoranti si dividono anche in particelle estremamente piccole, tanto che secondo le ricerche di Berthelot 1 grammo di muschio perderebbe 1 milligrammo di peso in 100 mila anni. Ma una divisibilità anche più grande è stata concepita nella Elettricità e se ne parlerà in un capitolo relativo alla costituzione della materia.

c) Compressibilità - Porosità - Elasticità. — Si ritiene che tutti i corpi sieno formati di particelle estremamente

piccole, dette *molecole*, che conservano tutte le proprietà del corpo. Pare che le molecole non siano a contatto. Infatti ogni corpo si contrae quando lo si comprime mediante un'azione meccanica qualsiasi o quando lo si raffredda; la diminuzione di volume è da attribuirsi alla diminuzione degli intervalli intermolecolari. In modo particolare è detta *compressibilità* la proprietà di tutti i corpi di diminuire di volume quando sono assoggettati a forze che agiscono su tutti i punti della loro superficie. Tale proprietà, rilevantissima nei gas (3), variabile nei corpi solidi, è praticamente nulla nei liquidi.

Gli intervalli intermolecolari di cui poco prima è stato detto, sono detti *pori fisici*, hanno dimensioni ultramicroscopiche e non vanno confusi con gli intervalli che spesso appariscono visibili nei corpi, come avviene nella carta da filtro, nella pomice, nello zucchero; questi ultimi vengono detti *pori sensibili* e se ne trae profitto per la *filtrazione*.

Per tale operazione si usano i *filtri*. Nei laboratori questi sono formati spesso con la così detta *carta da filtro*, che è carta senza colla. La carta viene piegata sì da formare una specie di serbatoio conico poggiato entro un imbuto di vetro (fig. 7).

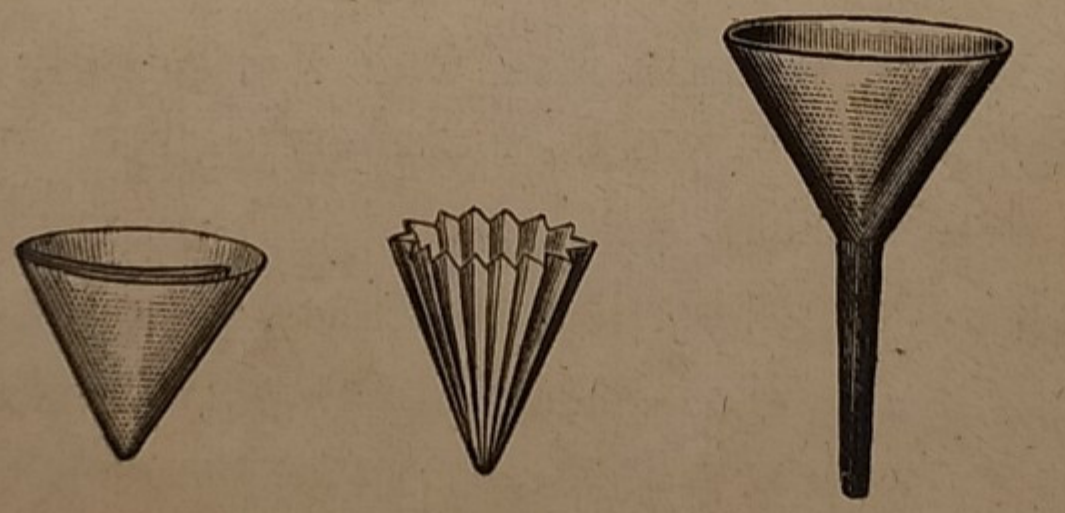

Fig. 7.

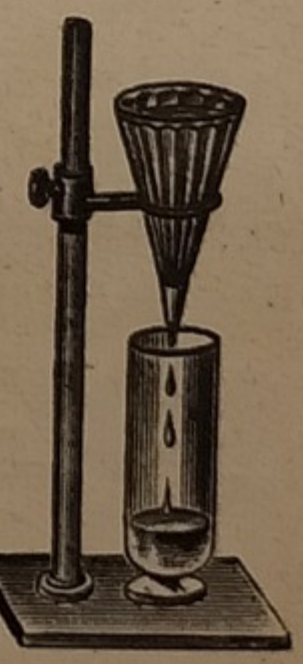

Fig. 8.

Nel filtro si versa un liquido che contenga in sospensione delle piccolissime particelle che lo rendono torbido.

Il liquido passa attraverso i forellini della carta (fig. 8), le particelle solide rimangono nel filtro, sia perchè possono avere dimensioni superiori ai fori del filtro, sia per l'attrazione esercitata dalle fibre del filtro sulle particelle stesse. A questo

proposito è stato osservato che con filtri fatti di lamine di porcellana porosa, i cui pori non arrivano a 30 μ, venivano trattenuti dei microrganismi che non arrivavano a 1 μ di diametro.

Tutti i corpi sono *elastici*, ossia dopo essere stati deformati o ridotti di volume mediante un'azione meccanica qualunque, mostrano la tendenza a riprendere la forma o il volume primitivo quando cessa la causa che aveva prodotto tale modificazione.

Però tale proprietà è molto accentuata in alcuni corpi, che perciò si chiamano senz'altro *elastici*, come nel vetro, nell'acciaio, ecc.; in altri è poco accentuata, per es. nel piombo; questi ultimi corpi si dicono perciò comunemente *anelastici*.

d) Dilatabilità. — Tutti i corpi, riscaldati, raffreddati o sottoposti a speciali sforzi meccanici, cambiano di volume.

E in particolare chiamasi *dilatabilità* la proprietà dei corpi di cambiar di volume per effetto di riscaldamento o raffreddamento, e *comprimibilità*, come già si disse (13), la proprietà di cambiar di volume sotto l'azione di una forza premente.

La dilatabilità è messa in vista con facili esperimenti:

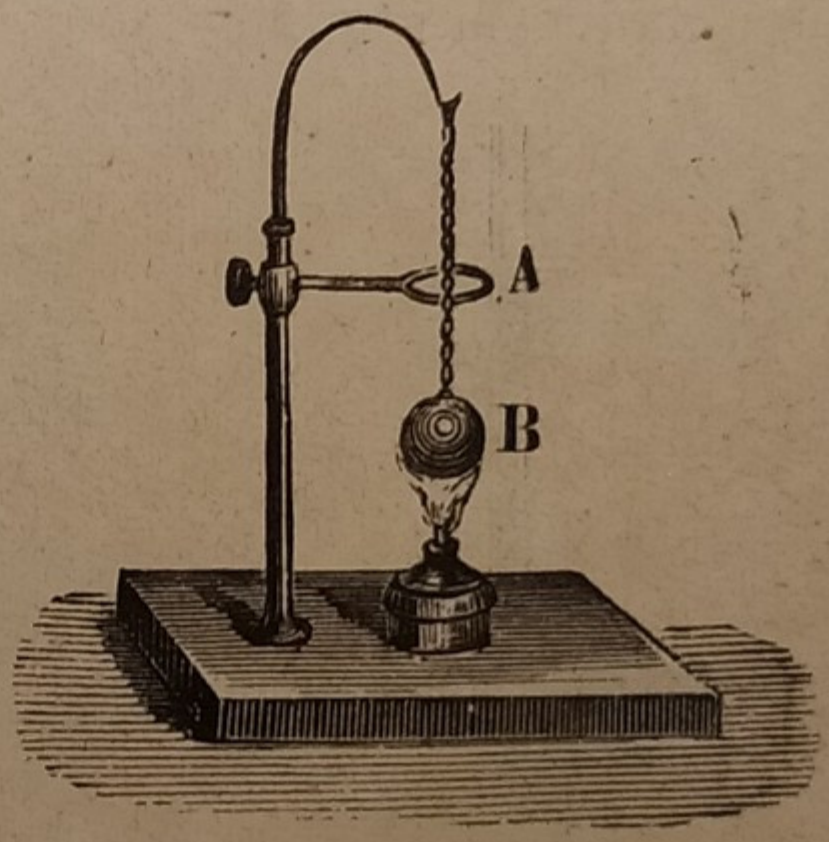

Fig. 9.

Una sfera *B* (fig. 9) di metallo passa a freddo appena appena attraverso un anello metallico *A*; scaldata, la sfera non passa più e rimane appoggiata sull'anello. Dopo qualche tempo però la sfera torna a passare attraverso l'anello per la contrazione dovuta al raffreddamento e un po' anche per un leggero allargamento dell'anello dovuto al calore che la sfera gli ha comunicato.

Una sbarra metallica *C* (fig. 10), disposta in posizione orizzontale, ha l'estremo di sinistra fissato in una morsetta;

l'estremo di destra libero, poggia contro una leva *DOE*, la cui estremità libera fa da indice in corrispondenza di un arco diviso.

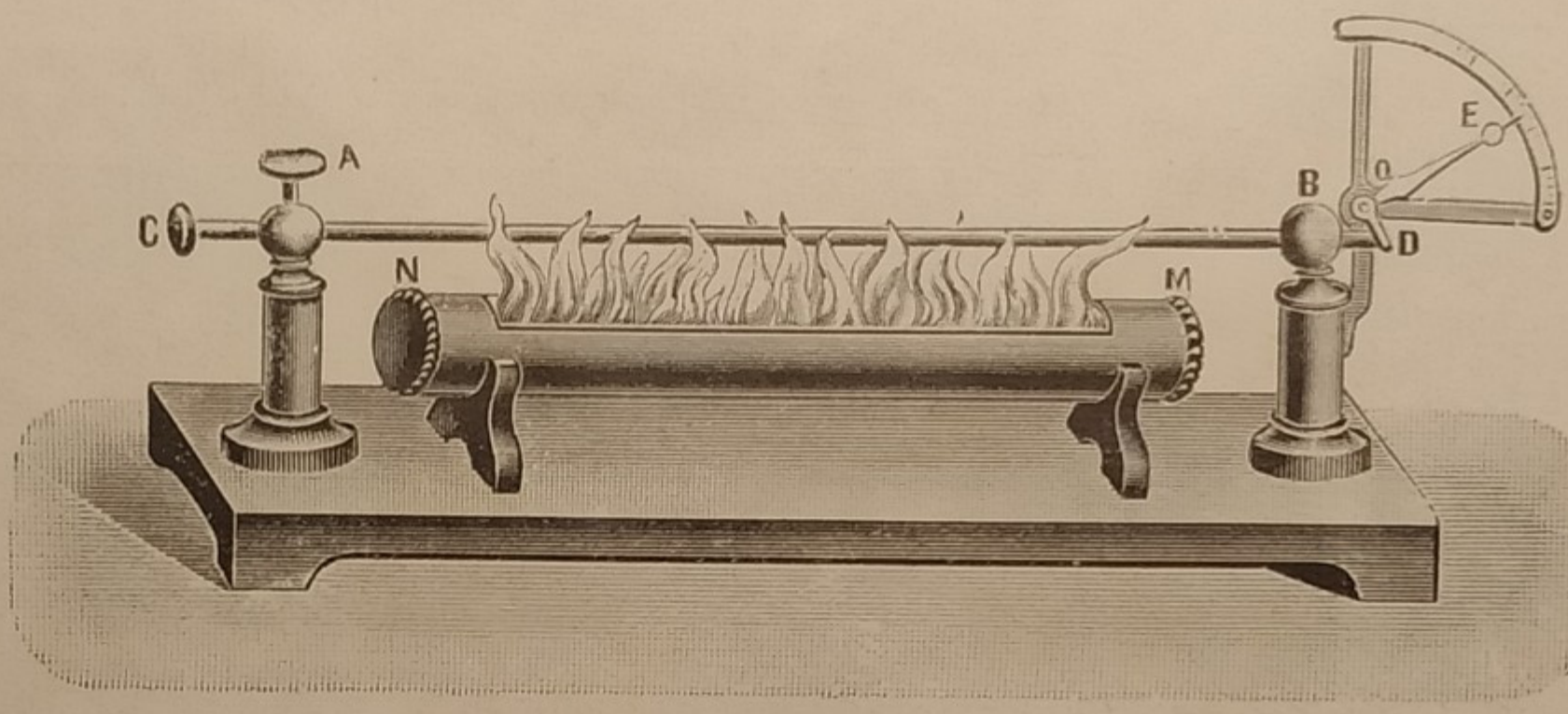

Fig. 10.

Si osserva la divisione iniziale sulla quale si trova l'indice; riscaldando la verga in qualche modo, ad esempio, ponendovi sotto una serie di fiammelle a gas, si osserva che l'indice si muove sull'arco diviso mostrando che l'asta si allunga. Spenta la fiamma, l'indice ritorna al punto di partenza.

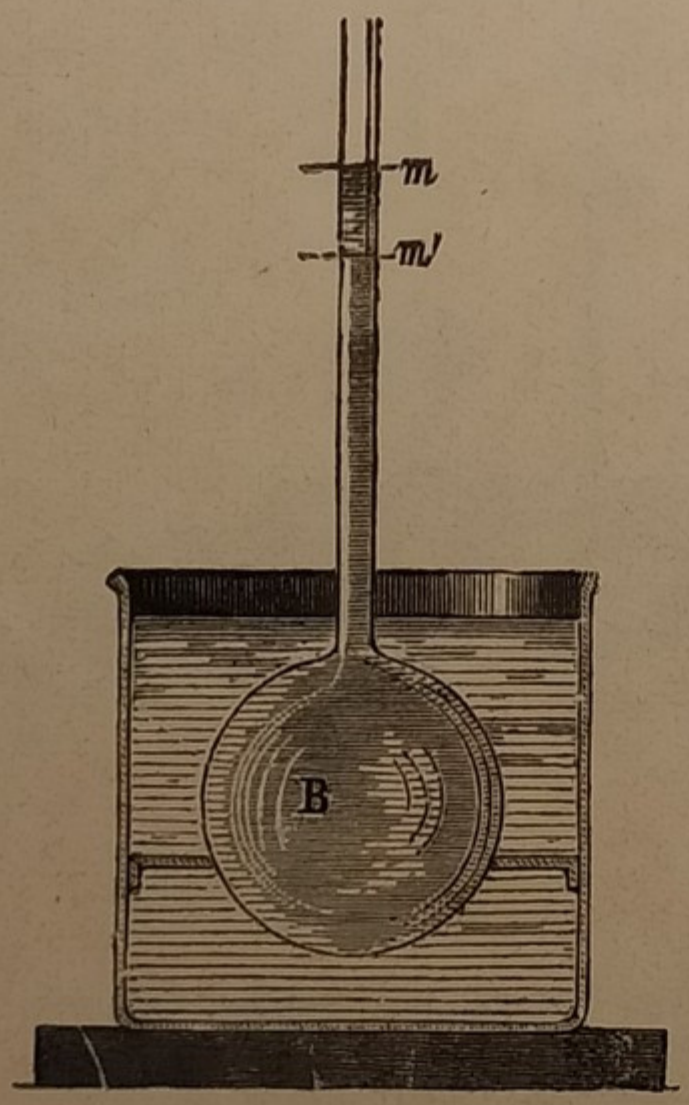

Fig. 11.

Un palloncino di vetro (fig. 11), è unito a un tubo piuttosto stretto e lungo, e il liquido, ad es. alcool colorato, che riempie il palloncino, arriva nel cannello a un punto *m*, che viene in qualche modo segnato sul cannello. Immergendo bruscamente il palloncino nell'acqua ben calda, il livello del liquido si abbassa prima sino a un punto *m'*, poi sale e oltrepassa la posizione di partenza. Il calore dapprima dilata il recipiente, perciò il liquido scende per l'aumentata capacità di questo; in seguito il calore passa al liquido, che dilatandosi più del vetro, sale nel cannello.

I gas sono assai più sensibili all'azione del calore che non i solidi e i liquidi, sicchè quando vengono riscaldati si può in essi riscontrare un notevole aumento di volume. Un palloncino (fig. 12) è unito a un cannello di vetro orizzontale piuttosto stretto, in cui si pone una goccia di liquido colorato *A* che fa da indice e che separa l'aria interna dall'aria esterna. Col riscaldamento anche moderato del palloncino, ottenuto appoggiandovi sopra il palmo della mano, si osserva che l'indice liquido si muove notevolmente nel cannello verso l'esterno.

Fig. 12.

MECCANICA

Il movimento è il fenomeno fisico per eccellenza; tutti i fenomeni fisici son dovuti a movimenti dei corpi o delle loro particelle.

La *Meccanica*, ossia la Scienza del moto, si divide in tre parti:

la *Cinematica*, che studia il moto dei corpi, indipendentemente dalle cause che lo producono e lo modificano;

la *Statica*, che studia le cause del moto in condizioni da elidersi nei loro effetti;

la *Dinamica*, che si occupa del movimento in relazione con le cause che lo producono.

Cinematica.

5. Traiettoria - Direzione del moto. — Per semplificare il nostro studio cominceremo a considerare il moto di un corpo avente dimensioni estremamente piccole, cui daremo il nome di *punto materiale*.

Tale punto movendosi genera nello spazio una linea, detta *traiettoria*, e a seconda della forma di questa distinguiamo il moto in *rettilineo* e *curvilineo*. Quest'ultimo, a seconda della

natura specifica della curva, potrà suddistinguersi in moto *circolare*, *ellittico*, *parabolico*, ecc.

Se il moto è rettilineo, è evidente che la *direzione* del moto è la direzione della retta percorsa dal mobile. Se il mobile dercorre una curva XX_1 (fig. 13) e in due istanti successivi si

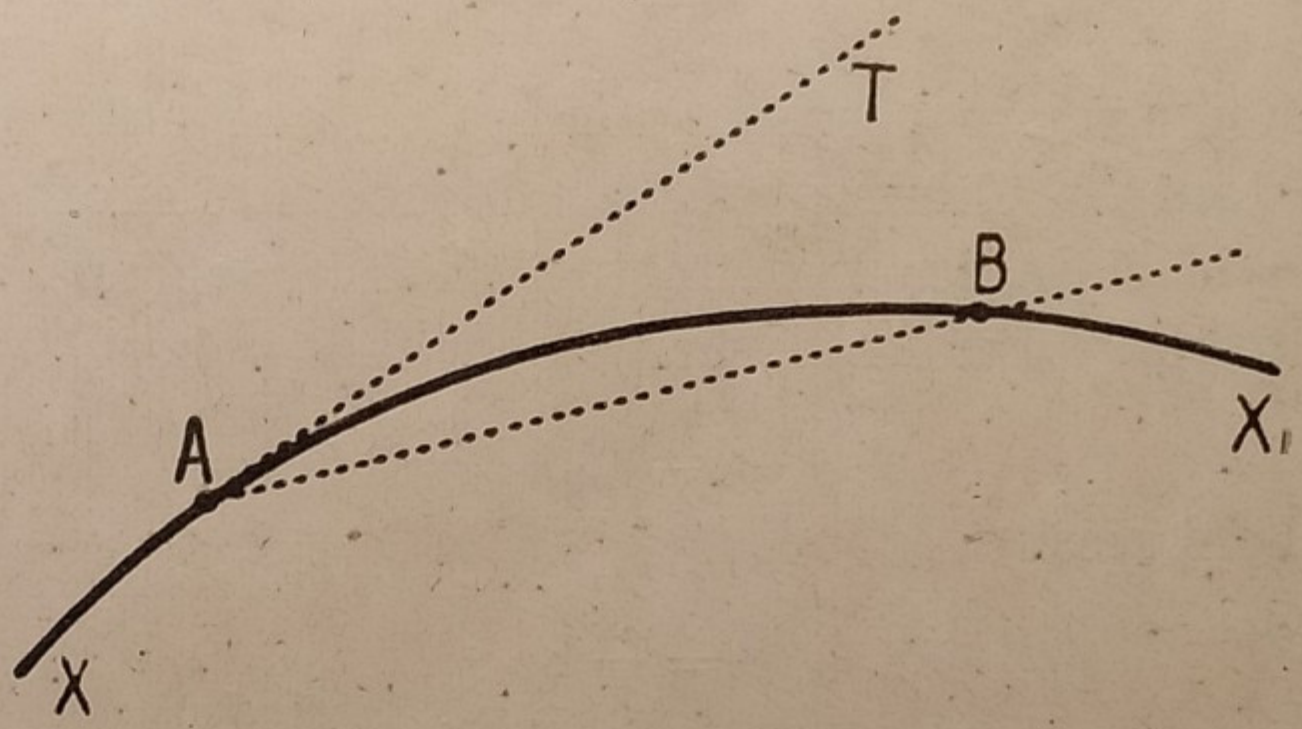

Fig. 13.

trova in A e B, la direzione della secante AB è la direzione media del moto del corpo da A a B. Ma quando si considera che il punto B si accosti indefinitamente ad A, la detta secante tende verso la tangente AT alla curva nel punto A, sicchè la direzione del moto di un punto che si muove sopra una curva, cambia da un istante all'altro ed è, per un dato istante, ossia per una data posizione del punto sulla curva, la direzione che ha la tangente alla curva nel punto in cui il mobile si trova.

6. Moto uniforme e vario - Moto uniformemente vario. — Lo scopo principale della cinematica è la ricerca delle *leggi* dei vari moti, ossia della relazione fra lo *spazio* percorso dal mobile e il *tempo* impiegato a percorrerlo. La parola *spazio* usata in cinematica significa la porzione di traiettoria percorsa dal mobile in un certo tempo, e si intenderà misurato in centimetri, a meno che non se ne faccia una particolare dichiarazione.

Per la misura della durata dei fenomeni fisici si usa di solito il *secondo*, cioè il minuto secondo di *tempo medio*. È la 86400^{ma} parte del *giorno solare medio*.

Il moto si dice *uniforme* se il mobile percorre *spazi eguali in tempi eguali comunque piccoli*. La legge del moto uniforme è per conseguenza questa: *gli spazi percorsi sono proporzionali ai tempi impiegati a percorrerli*. Perciò indicando con s lo spazio percorso dal mobile in un tempo t, avremo:

$$s = kt$$

dove k è un numero costante per un determinato moto.

Tale costante si chiama *velocità* di quel dato moto uniforme e di solito lo si indica nei trattati di Fisica colla lettera v, sicchè la detta formola si scrive più spesso così:

$$s = vt,$$

dalla quale si ricava:

$$v = \frac{s}{t} ;$$

perciò la velocità in un dato moto uniforme è *lo spazio percorso dal mobile in un secondo*.

Qualunque moto non uniforme si dice *vario*. In generale i moti che riscontriamo in natura, come quelli prodotti ad arte, sono moti vari.

Un solo moto noi conosciamo che è uniforme, o almeno dobbiamo ritenerlo uniforme in mancanza di argomenti per cui si possa ritenerlo vario; esso è il moto di rotazione della Terra attorno al suo asse. Altri moti naturali, come il moto di rivoluzione della Terra attorno al Sole, il moto di caduta dei corpi, e per citare qualche moto artificiale, quello di un veicolo qualunque, di un orologio, ecc., sono vari.

Nel moto vario non si può definire la velocità come nel moto uniforme, poichè lo spazio percorso nelle singole unità di tempo è variabile. Una grandezza che nel moto vario può, fino ad un certo punto, equipararsi alla velocità nel moto uniforme, è la *velocità media*, e precisamente si definisce *velocità media durante un certo tempo* t, o nell'intervallo $AB = s$ percorso nel tempo t, il quoto fra lo spazio e il tempo impiegato a percorrerlo. Indicandola con v_m avremo per definizione:

$$v_m = \frac{s}{t} .$$

Così quando si dice che un determinato treno cammina alla velocità di 50 km. all'ora, si vuol indicare la velocità media del treno, che si ottiene dividendo la distanza chilometrica fra le due stazioni estreme per il numero delle ore che dura il percorso.

Notiamo qui alcune velocità medie, in metri al secondo, tolte dalla *Fisica* del Roiti (Ed. Le Monnier):

Un buon camminatore	1,60
Un cavallo al trotto per viaggio . . .	da 2 a 2,20
Un cavallo al galoppo	4 a 5
Vento ordinario	da 5 a 6
Treno a 60 km. l'ora	16,67
Piccioni viaggiatori	18
Uragano	40
Gli uccelli più rapidi	89
Propagazione del suono a 10°, nell'aria .	340
Un punto dell'equatore terrestre . . .	463
La Luna attorno alla Terra	1012
La Terra attorno al Sole	29.516
La luce nel vuoto	300.000.000

Nella Cinematica, però, più importante è la così detta *velocità all'istante*, che si può precisare con il seguente ragionamento:

XY sia la traiettoria percorsa dal mobile nel senso da X verso Y e sia O la posizione occupata dal mobile all'*istante zero*, ossia nell'istante *da cui* si conta il tempo e A e B le posizioni occupate dallo stesso mobile agli istanti t e $t + \tau$ (fig. 14).

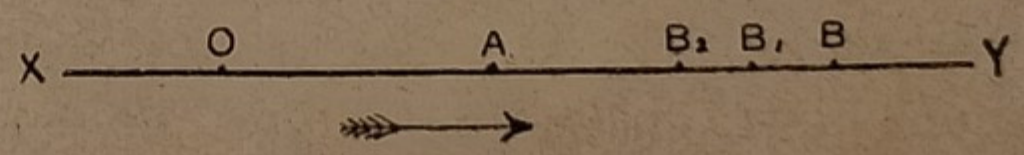

Fig. 14.

Ciò vuol dire che dopo t secondi il mobile è in A, dopo $t + \tau$ secondi in B, sicchè impiega τ secondi per passare da A in B. il quoto $\frac{AB}{\tau}$, misura, come s'è detto, la velocità media nell'intervallo di tempo τ.

Ma se a partire dall'istante t si considera il moto per intervalli di tempo τ_1 τ_2 . . . sempre più piccoli, e sono AB_1 AB_2 . . .

gli spazi rispettivamente percorsi dal mobile, i quoti $\frac{AB_1}{\tau_1}$, $\frac{AB_2}{\tau_2}$ ... misurano le velocità medie relative agli intervalli τ_1 τ_2 ... e qualunque sia il moto si riscontra che i valori di tali quoti, a mano a mano che l'intervallo di tempo τ diminuisce, differiscono uno dall'altro via via sempre meno, ossia *tendono verso un limite determinato* che si prende come misura della *velocità all'istante t.* Sicchè *la velocità ad un dato istante è il limite a cui tendono i valori delle velocità medie, quando a partire dall'istante considerato si considera il moto per intervalli di tempo via via sempre più piccoli.* E riassumendo si può dunque anche dire che la velocità all'istante è la velocità media relativa a un piccolissimo intervallo di tempo che segue l'istante considerato.

Quando occorra usare dei simboli, noteremo la velocità nel punto A, ossia all'istante t, colla notazione v_A o v_t che leggeremo *velocità in A*, oppure *velocità al tempo* o *all'istante t.*

Or se in un dato moto riscontriamo che la velocità all'istante zero è, ad esempio, 5^{cm} al secondo, e dopo 1 secondo è 7^{cm}, dopo 2 secondi 9^{cm}, dopo 3 secondi 11^{cm}, ecc., se cioè la velocità all'istante *subisce un aumento costante ad ogni unità di tempo*, il moto si dice *uniformemente accelerato.* Se, all'opposto, si riscontrerà che la velocità all'istante *diminuisce* di una quantità costante ad ogni unità di tempo, avremo il moto *uniformemente ritardato.* L'uno e l'altro dei due moti si comprendono sotto il nome di *moto uniformemente vario.* Per quanto si è detto, indicata con v_o la velocità del mobile all'istante zero, che è anche detta velocità *iniziale*, la velocità v all'istante t verrà data dalla formola:

$$v_t = v_o \pm at, \qquad (1)$$

nella quale a, che rappresenta l'*aumento* o la *diminuzione costante* che la velocità del mobile subisce ad ogni secondo, si chiama *accelerazione.* Il moto uniformemente vario si può quindi anche definire il moto in cui si ha un'accelerazione — positiva o negativa — costante. Notisi che per tale considerazione il moto uniforme può essere inteso come caso parti-

colare di moto uniformemente vario, ossia come un moto uniformemente vario con accelerazione *zero*, in cui cioè la velocità è costante, come afferma la formola (1) nella quale si faccia $a = 0$.

Con un procedimento, che per l'indole elementare di questo libro non possiamo sviluppare, si viene a dimostrare che lo spazio s_t percorso dal mobile nel tempo t, quando rimangono fisse le condizioni sopra stabilite, è dato dalla seguente formola:

$$s_t = v_o t \pm \frac{1}{2} a t^2 . \qquad (2)$$

Nel caso di un moto uniformemente accelerato, con velocità iniziale zero, le formole (1) e (2) diventano:

$$v_t = at \qquad (1)'$$

$$s_t = \frac{1}{2} a t^2 . \qquad (2)'$$

Questo moto speciale è stato chiamato da Galileo *moto naturalmente accelerato*, poichè lo si riscontra talvolta in natura; tale per esempio, come si vedrà, è il moto di caduta dei corpi.

Le formole (1)′ e (2)′ contengono evidentemente le seguenti leggi, che dicono che nel moto naturalmente accelerato:

1° *la velocità è proporzionale al tempo;*

2° *lo spazio è proporzionale al quadrato del tempo impiegato a percorrerlo.*

Giova talora esprimere la velocità v_t posseduta da un mobile che si muove con moto naturalmente accelerato, in funzione dello spazio e dell'accelerazione. Basta eliminare il tempo tra le (1)′ e (2)′, si ha così:

$$v_t = \sqrt{2a\, s_t} . \qquad (3)$$

Notiamo infine che la formola (2)′ ci permette di trovare una relazione fra gli spazi percorsi dal mobile nelle *successive* unità di tempo. Chiamiamo coi simboli s', s'', s''' ..... gli

spazi percorsi nel 1°, nel 2°, nel 3° . . . secondo; mentre coi simboli s_1, s_2, s_3 . . . notiamo gli spazi percorsi in uno, in due, in tre . . . secondi. Si ha evidentemente:

$$s' = s_1 ; \quad s'' = s_2 - s_1 ; \quad s''' = s_3 - s_2 \ldots$$

Ma per la (2)′ abbiamo:

$$s_1 = \frac{1}{2} a, \qquad s_2 = \frac{1}{2} a \times 4 ; \qquad s_3 = \frac{1}{2} a \times 9 \ldots\ldots$$

Quindi:

$$s' = \frac{1}{2} a , \qquad s'' = \frac{1}{2} a \times 4 - \frac{1}{2} a ;$$

$$s''' = \frac{1}{2} a \times 9 - \frac{1}{2} a \times 4 \ldots\ldots$$

o meglio:

$$s' = \frac{1}{2} a , \qquad s'' = 3 \times \frac{1}{2} a ; \qquad s''' = 5 \times \frac{1}{2} a \ldots\ldots$$

Cioè nel moto naturalmente accelerato gli spazi percorsi nelle *singole* e *successive* unità di tempo *stanno fra loro come i numeri dispari della serie naturale*. È questa la legge dei *numeri dispari* scoperta dal nostro Galilei nella caduta dei corpi.

7. Moto periodico (circolare, oscillatorio). — È detto *periodico un moto nel quale il corpo passa per uno stesso punto ad intervalli eguali di tempo con la stessa velocità;* stessa, in valore assoluto e segno. L'intervallo di tempo che decorre tra due successivi passaggi per uno stesso punto è detto *periodo*. E se si tratta di moti periodici assai rapidi — vibrazioni sonore, luminose e simili — è detta *frequenza* il numero dei periodi al secondo. Quindi fra periodo T e frequenza N corre, per definizione, la relazione:

$$NT = 1 .$$

Numerosi sono gli esempi di moti periodici: il movimento dei pianeti intorno al Sole e dei satelliti intorno ai pianeti;

il movimento di un pendolo, e quello di una corda sonora vibrante, ecc.

Prendiamo prima in considerazione il *moto circolare uniforme*, cioè il moto di un punto che descrive una circonferenza percorrendo archi di lunghezza proporzionale ai tempi impiegati a descriverli.

Si chiama *velocità tangenziale* o *lineare*, la *lunghezza* dell'arco v percorso dal punto in un secondo; se T è il *periodo*, cioè la durata di un giro, e r il raggio della circonferenza, si ha evidentemente:

$$2\pi r = vT$$

ossia:

$$v = \frac{2\pi r}{T} . \qquad (1)$$

Si chiama invece *velocità angolare* l'*ampiezza* dell'arco descritto dal mobile in un secondo. Tale velocità può essere espressa in gradi, e in tal caso, indicandola con n^o, si ha:

$$n^o = \frac{360^o}{T} ; \qquad (2)$$

ma può anche esprimersi in *radianti*; in questo caso la si indica con ω, e ricordando che l'ampiezza della circonferenza vale 2π radianti, si ha:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} . \qquad (3)$$

Quando si tratta di moti rotatori molto rapidi — turbine, motori elettrici, ecc. — nelle formole anzidette è più comodo far apparire la frequenza N in luogo del periodo T, ciò che risulta assai semplice tenendo presente la relazione data più sopra fra frequenza e periodo. Con ciò le formole (1), (2), (3) diventano:

$$v = 2\pi r N \qquad (1)'$$

$$n^o = 360^o N \qquad (2)'$$

$$\omega = 2\pi N. \qquad (3)'$$

Importantissimo per lo studio di molti fenomeni fisici è il *moto oscillatorio*, tipico il *moto pendolare*.

L'analisi del moto oscillatorio non è possibile senza il sussidio della trigonometria, quindi dobbiamo limitarci a riassumere brevemente il risultato di tale analisi.

Supponiamo che il moto oscillatorio avvenga sul segmento AB (fig. 15); il mobile inizia il suo moto da A diretto verso B con velocità crescente e arriva in O, punto medio del segmento AB, con la velocità massima. Proseguendo il suo cammino va da O a B con velocità simmetricamente decrescente e arriva in B con velocità zero. A questo punto il moto cambia senso: da B ad O è accelerato, come lo era da A ad O, ed è ritardato da O ad A, come lo era da O a B. Da questo istante le cose si ripetono con la stessa vicenda.

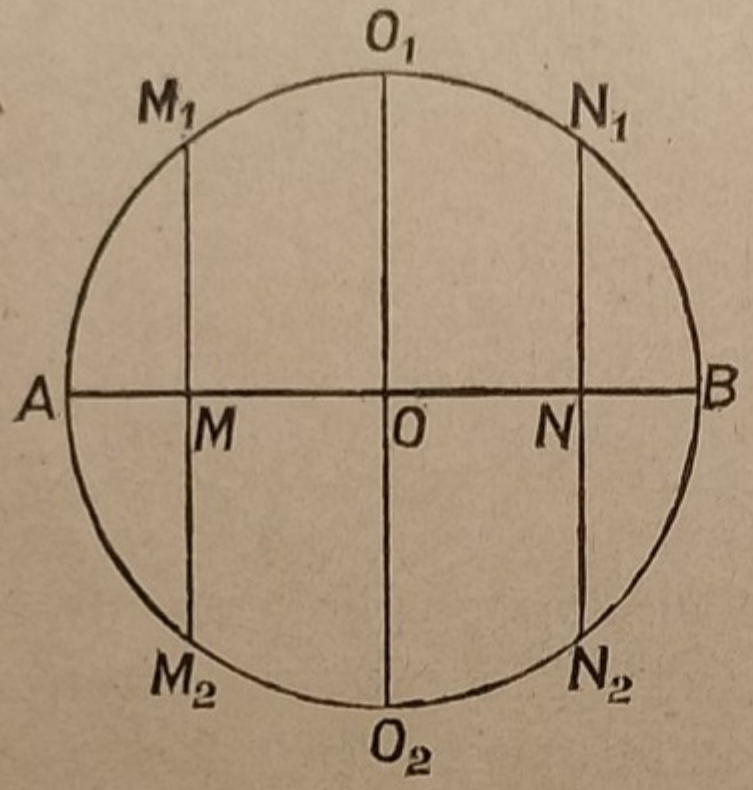

Fig. 15.

Oscillazione semplice è detto il passaggio da A a B o il ritorno da B ad A; *oscillazione completa* la somma di un'andata e di un ritorno. *Periodo* è la durata dell'oscillazione completa.

L'analisi citata dimostra che un punto che si muove con moto oscillatorio sopra un certo segmento AB è la proiezione su AB di un punto che percorre la circonferenza, che ha per diametro AB, con moto uniforme e che la velocità posseduta dal mobile in un punto qualunque della sua traiettoria è rappresentata in grandezza dal segmento condotto per quel punto perpendicolarmente ad AB e avente l'estremo sulla circonferenza, quando la velocità massima, quella che il mobile ha in O, sia rappresentata dal raggio della circonferenza stessa. Volendo poi tener conto del *segno* della velocità, *positivo* per l'andata da A ad B, *negativo* per il ritorno da B ad A, i segmenti rappresentanti le velocità positive saranno diretti verso l'alto, e verso il basso per le velocità negative. Così i segmenti MM_1 OO_1, NN_1, rappresentano le velocità nei punti M, O, N per

l'andata da A a B, e i segmenti opposti MM_2 OO_2 NN_2 le velocità negli stessi punti per il ritorno da B ad A.

In base a ciò risulta molto facile una rappresentazione grafica del moto oscillatorio. La circonferenza avente per diametro la traiettoria AB del punto oscillante, si divide in un certo numero di parti eguali, per es. 12 (fig. 16) e si segnano le rette parallele alla ABX passanti per le coppie di punti 1-5, 2-4, 7-11 8-10 e per i punti 3 e 9. Sulla ABX si prendono poi

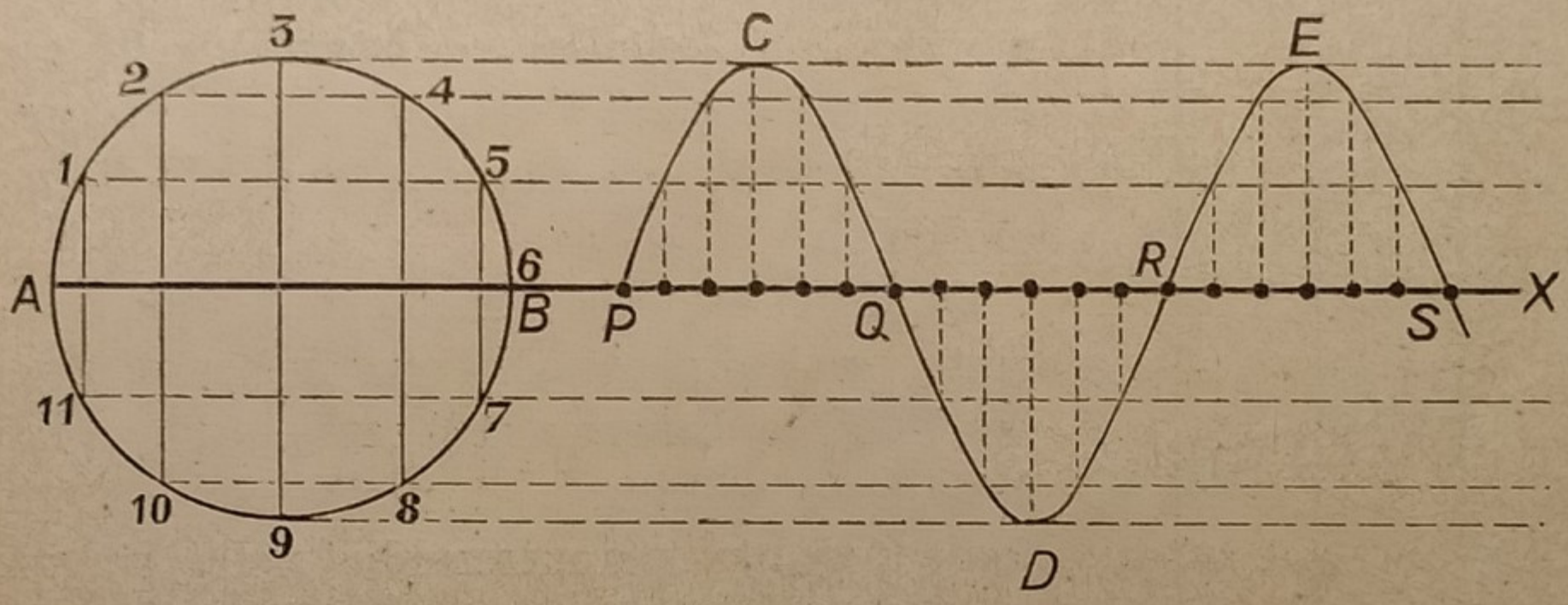

Fig. 16.

dei segmenti eguali PQ, QR, RS, ST . . . rappresentanti i mezzi periodi, ciascuno dei quali va diviso in 6 parti eguali di modo che ognuna di queste rappresenta $^1/_{12}$ di periodo. Ora dai punti di divisione di queste ultime parti si conducono delle perpendicolari alla ABX fino ad incontrare le parallele suddette, in modo che tali perpendicolari rappresentino le velocità nei rispettivi istanti secondo quanto sopra è stato spiegato. Riunendo i punti così ottenuti, abbiamo la curva $PCQDRE$ . . . rappresentante la velocità nel moto oscillatorio. Tale curva è nota in Trigonometria col nome di *sinusoide*.

8. Composizione dei movimenti. — Un corpo fa sempre parte di un sistema in moto. I corpi terrestri fanno parte di un sistema, la Terra, che è animata da più movimenti e in particolare da un moto attorno al Sole, il quale a sua volta col corteo dei pianeti, si muove nello spazio. Perciò un corpo che si muove alla superficie terrestre è contemporaneamente

soggetto anche ad altri moti; e un problema importante che si presenta è di tracciare la traiettoria percorsa effettivamente dal corpo nello spazio, ossia determinare il *moto risultante*. È il problema della *composizione dei movimenti*, la cui risoluzione è facilitata dal *Principio di Galileo*, che, come altri postulati della meccanica, è di origine sperimentale. Il principio prende anche il nome di *Principio della indipendenza dei movimenti* e si può enunciare così: *la posizione di un punto soggetto a diversi movimenti contemporanei è in qualunque istante quella che esso occuperebbe se i diversi moti avvenissero separatamente l'un dopo l'altro per la durata medesima.*

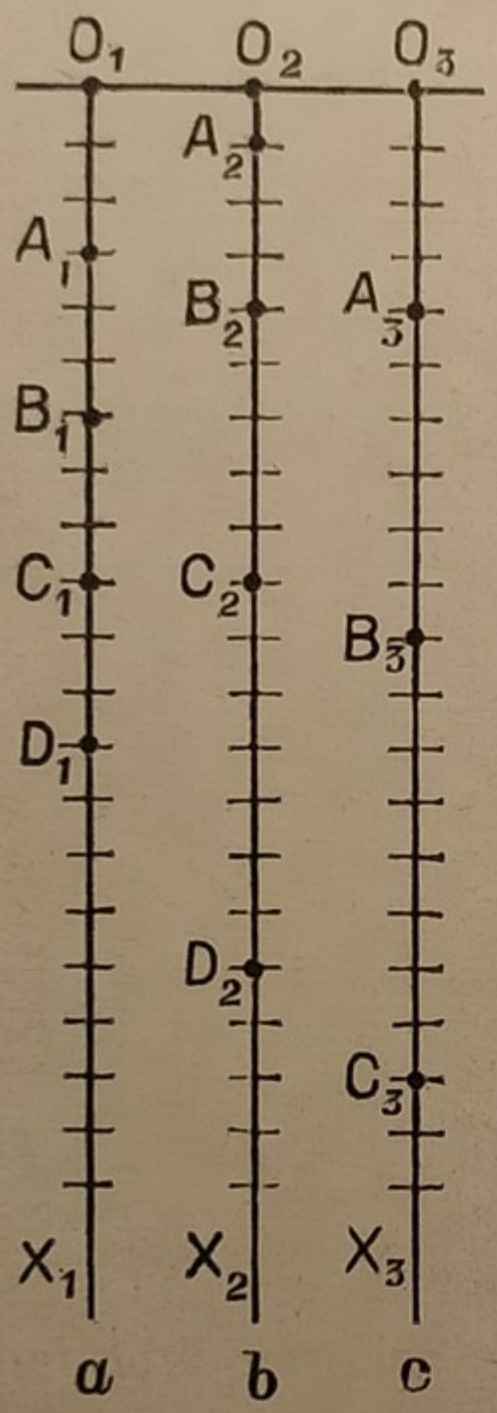

Fig. 17.

Qualche esempio: un corpo viene lanciato verticalmente dall'alto in basso. Esso per la legge d'inerzia (18) tende a muoversi con moto uniforme di modo che se non fosse pesante percorrerebbe nelle singole unità di tempo gli spazi eguali O_1A_1, A_1B_1, B_1C_1 . . . (fig. 17 *a*). Se non venisse lanciato ma venisse semplicemente abbandonato a se stesso, per effetto della gravità percorrerebbe con moto naturalmente accelerato (6) nelle successive unità di tempo gli spazi O_2A_2, A_2B_2, B_2C_2 . . . (fig. 17 *b*) che stanno fra loro come i quadrati dei tempi. Ora, poichè il corpo viene lanciato ed è contemporaneamente soggetto alla gravità, gli spazi effettivamente percorsi nelle singole unità di tempo sono la somma degli spazi che verrebbero separatamente percorsi per effetto del lancio e della gravità, cioè sono: $O_3A_3 = O_1A_1 + O_2A_2$; $A_3B_3 = A_1B_1 + A_2B_2$; $B_3C_3 = B_1C_1 + B_2C_2$; . . . (fig. 17 *c*).

Altrettanto facile riesce a trovare il moto risultante di due moti componenti, uno uniforme e l'altro naturalmente accelerato, effettuantisi nella stessa direzione ma in versi opposti. È il caso di un corpo lanciato verticalmente dal basso in alto.

Ci serviremo anche qui della figura 18, tracciata col criterio della precedente. Su O_1X_1 è rappresentato il moto componente uniforme dal basso all'alto dovuto al lancio; su O_2X_2 quello naturalmente accelerato dovuto alla gravità che si effettua in senso contrario, cioè dall'alto al basso; su O_3X_3 il moto risultante, nel quale gli spazi percorsi nelle singole e successive unità di tempo sono la differenza fra gli spazi rispettivi nei moti componenti. È cioè $O_3A_3 = O_1A_1 - O_2A_2$; $A_3B_3 = A_1B_1 - A_2B_2$; $B_3C_3 = B_1C_1 - B_2C_2$; $C_3D_3 = C_1D_1 - C_2D_2$. Si osservi che date le relazioni di lunghezza rappresentanti nella figura gli spazi componenti, C_3D_3 è negativo essendo $C_1D_1 < C_2D_2$ e a maggior ragione risulterebbero negativi gli spazi percorsi nelle unità di tempo successive. Il moto risultante per un certo tempo si effettua in salita, il mobile raggiunge la massima altezza, e poi discende.

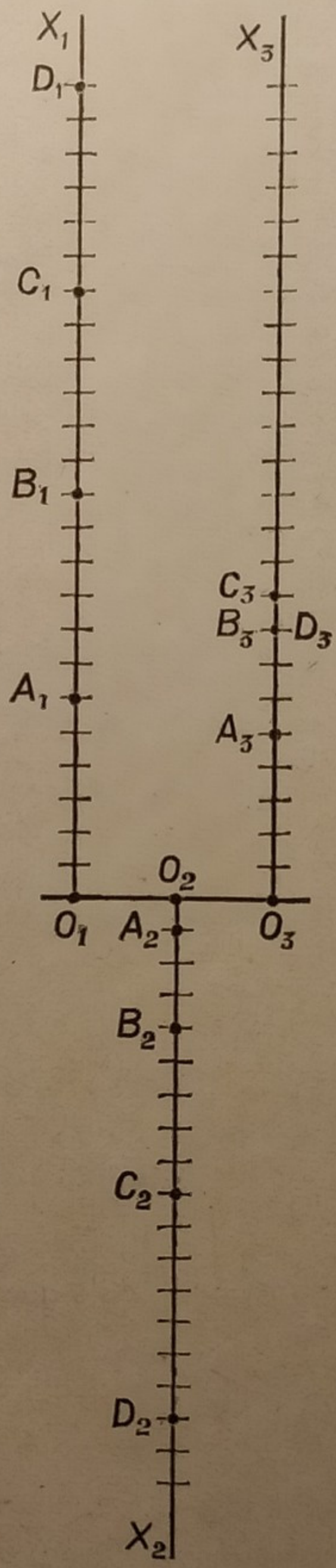

Fig. 18.

Più complessa è la questione per due moti componenti aventi direzioni diverse, ma si può sempre determinare con facilità la posizione occupata a un istante qualunque nel moto risultante. Consideriamo un solo caso che, salvo differenze dovute a cause che non possono qui essere prese in considerazione, si verifica spesso: quello di un proiettile lanciato in una direzione non verticale.

Il proiettile è lanciato nella direzione OZ (fig. 19), sulla quale i segmenti eguali OA_1, A_1B_1, B_1C_1 ... rappresentano gli spazi relativi alle singole unità di tempo del moto componente uniforme dovuto al lancio, e sulla direzione ver-

ticale YOY_1 sono segnati i segmenti OA_2, A_2B_2, B_2C_2... rappresentanti i rispettivi spazi del moto componente naturalmente accelerato dovuto alle gravità.

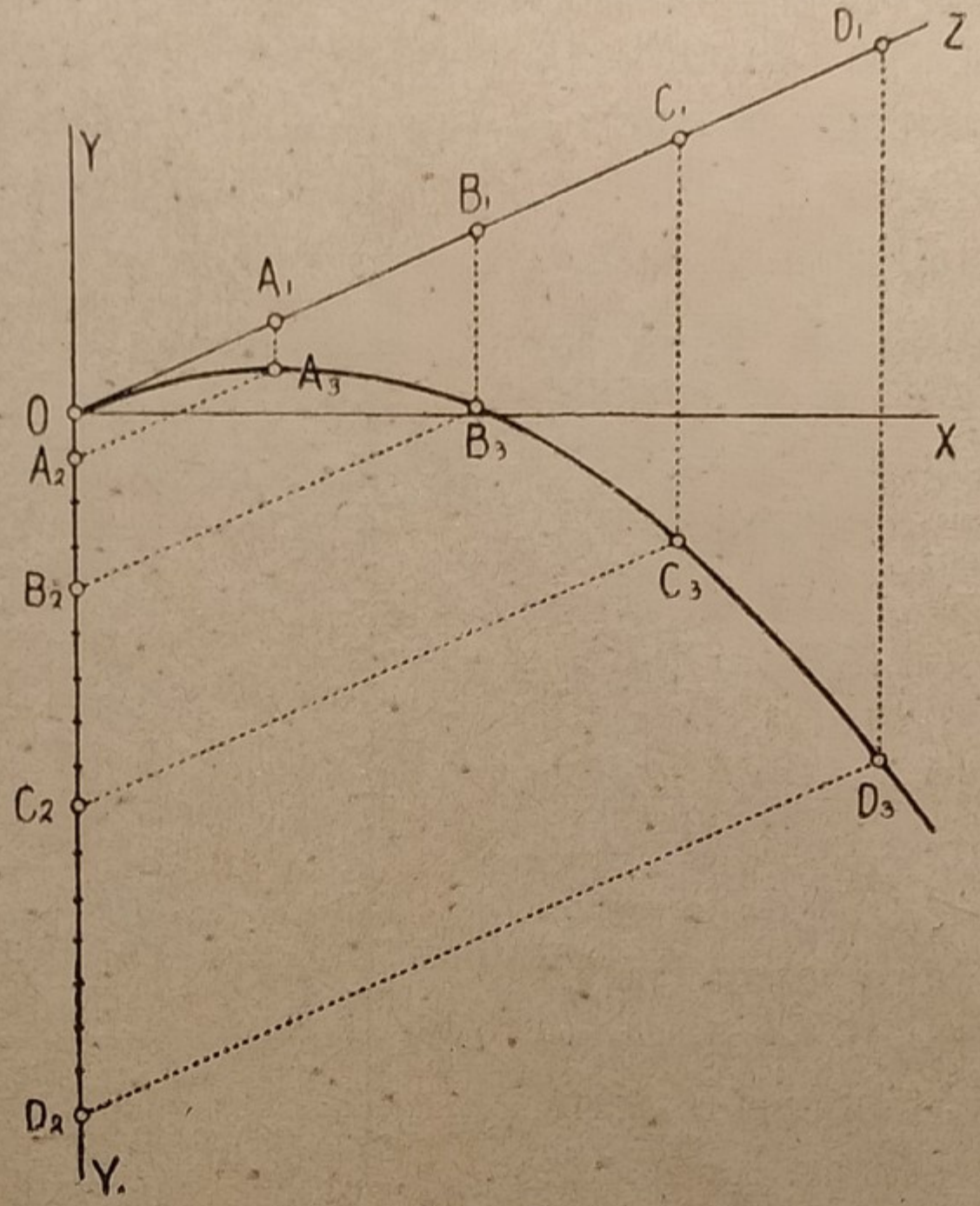

Fig. 19.

In base al principio di Galileo, la posizione occupata dal proiettile dopo 1 secondo è A_3, perchè dopo 1 secondo, obbedendo al moto lungo la OZ si troverebbe in A_1, e da qui dopo 1 secondo, obbedendo alla gravità, passerebbe in A_3 percorrendo $A_1A_3 = OA_2$. Analogamente dopo 2 secondi si trova in B_3, dopo 3 secondi in C_3... Il proiettile segue la curva parabolica che comprende quei punti.

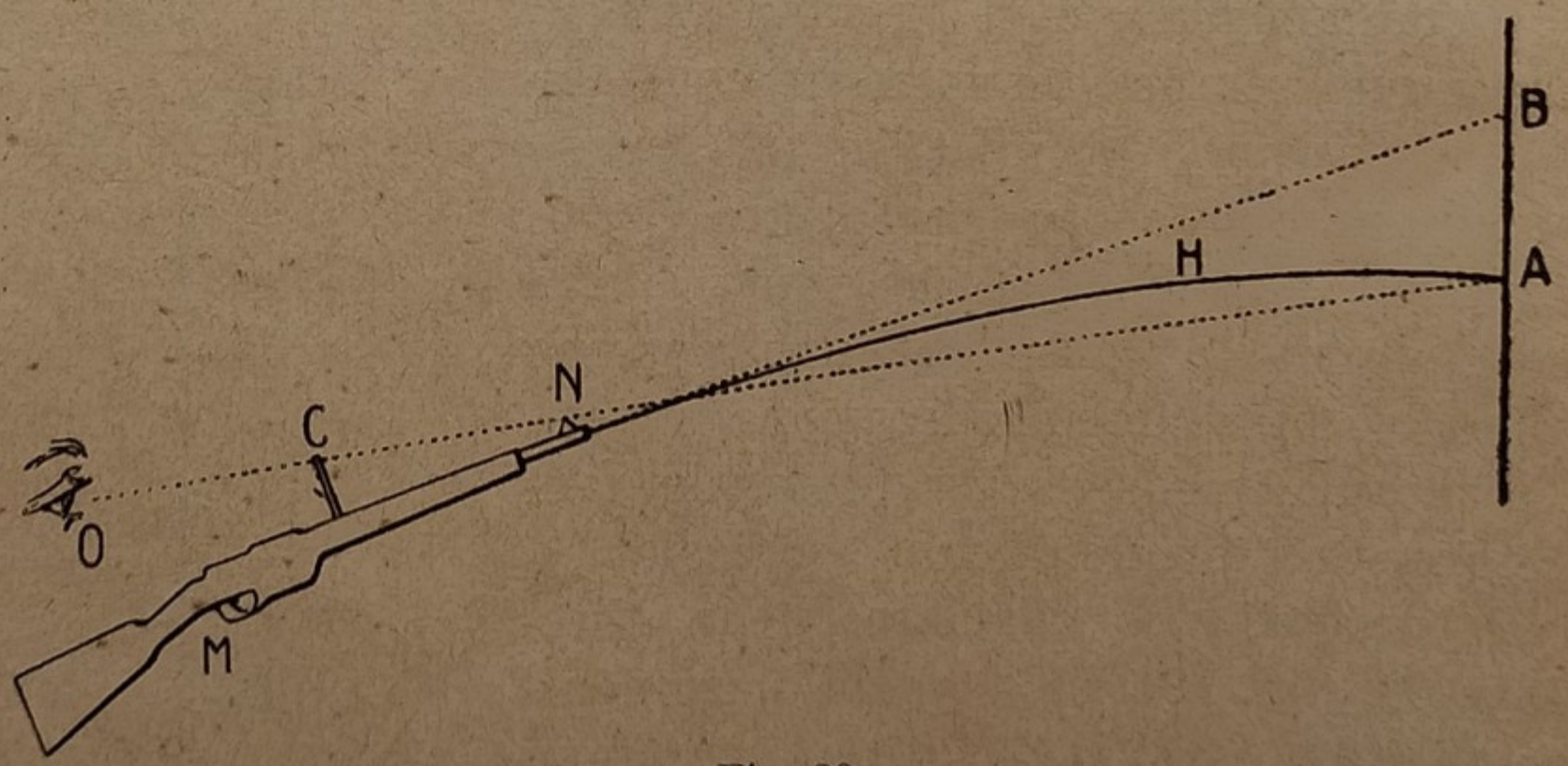

Fig. 20.

Questa discussione rende ragione della necessità dell'*alzo* nelle armi da fuoco. Se, ad es., con un fucile M (fig. 20) un

tiratore si propone di colpire un determinato punto A del bersaglio, egli deve *prender la mira*, cioè disporre il fucile in modo che il punto da colpire A si trovi allineato con l'occhio O, coll'estremità C dell'alzo e col mirino N. In tal modo l'asse dell'arma incontra il bersaglio in un punto B che sta verticalmente sopra il punto A; il proiettile descrive la parabola NHA e perchè il punto A venga colpito è necessario che BA sia eguale all'abbassamento subito dal proiettile per effetto della gravità, durante il tempo che impiega per andare dal fucile al bersaglio. Se, ad es., la pallottola si muove con una velocità media di 400 metri, e il bersaglio dista 200 metri, il proiettile impiega un mezzo secondo a compiere la sua traiettoria, nel qual tempo la gravità produce sul proiettile un abbassamento:

$$BA = \frac{1}{2}\, at^2$$

questa è in sostanza la formola (2)′ del § 6. Ma $\frac{1}{2}\, a$ è lo spazio percorso da un corpo cadente nel 1° secondo ed è eguale a $4^m,90$ circa; quindi essendo $t = \frac{1}{2}$ secondo, è:

$$BA = 4,90 \times \left(\frac{1}{2}\right)^2$$

ossia:

$$BA = 1^m,225\,.$$

È quasi superfluo aggiungere che quanto è stato sopra detto vale solo per il moto dei proiettili nel vuoto; la presenza dell'aria modifica fortemente il risultato finale.

Statica.

9. Concetto di forza; equilibrio; unità statica di forza. — È detta *forza qualunque causa capace di modificare lo stato di quiete o di moto di un corpo.* La gravità è la forza che fa cadere i corpi; lo sforzo che un essere vivente esercita per spingere o per tirare un corpo, la pressione del vapore contro lo stantuffo

d'una macchina, l'attrazione di una calamita sopra un pezzo di ferro e simili, sono delle forze.

In una forza occorre distinguere: 1° il *punto di applicazione*, ossia il punto sul quale agisce la forza; 2° la *direzione*, che è la direzione della retta su cui il corpo tende a muoversi sotto l'azione della forza; 3° il *senso* o *verso*, che è il senso o verso del moto che il corpo tende ad acquistare; 4° l'*intensità*, ossia la grandezza della forza, che è misurata dalla grandezza dell'effetto prodotto.

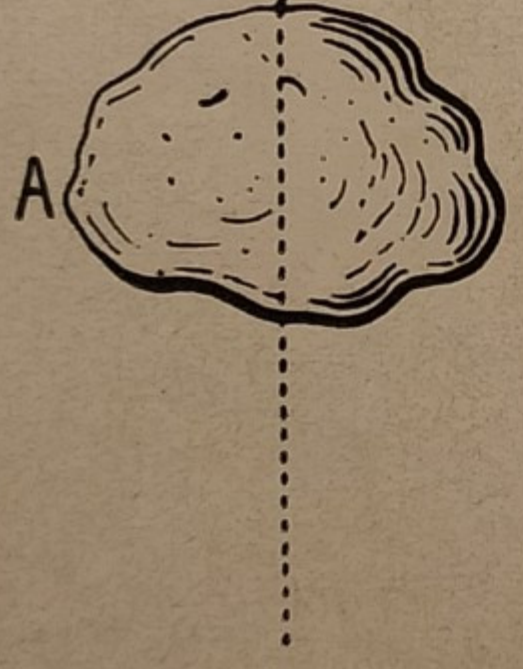

Fig. 21.

Per precisare tali elementi, consideriamo la forza di gravità. Un corpo *A* (fig. 21) è attaccato per il punto *B* ad un filo *C* molto flessibile, fissato all'estremo superiore *O*. Si osserva che, dopo alcune oscillazioni, il corpo si mette in riposo e il filo prende nello spazio una direzione determinata. Or è evidente che un filo flessibile prende sempre la direzione della forza che lo sollecita; dunque nel caso che contempliamo la *direzione* del filo segna la *direzione* della forza di gravità agente sul corpo.

È facile riscontrare che il filo si dispone *verticale*, ovverosia perpendicolare alla superficie delle acque stagnanti e la sua direzione passa approssimativamente per il centro della Terra.

Perciò diremo che la gravità è una forza *verticale*, il cui senso è *dall'alto al basso*. Nel caso ora contemplato poi, riguardo al punto di applicazione della forza, potremo ritenere che esso sia il punto *O* o il punto *B*; ma per ragioni, che verranno dilucidate in seguito, riterremo come punto di applicazione un altro punto giacente sulla direzione *OB*, che ha particolari caratteri. Il punto di applicazione di una forza è in generale indeterminato, e si può considerare come tale un punto qualunque della sua direzione.

Notiamo infine che un corpo sospeso ad un filo flessibile, com'è quello della precedente figura, costituisce il così detto *filo a piombo* o *piombino*, al quale praticamente si dà la forma della figura 22; esso segna la verticale che passa per il suo punto di sospensione, ed ha, com'è noto, un larghissimo uso.

Fig. 22.

Se un sistema di forze applicate a un corpo non ne modifica lo stato di quiete o di moto, le forze sono cioè tali che i loro effetti, per usar una frase comune, si *elidono*, diremo che si fanno *equilibrio* o anche che quel sistema di forze è un *sistema equilibrato*. Accetteremo per intuizione vero quanto segue: che due forze sieno eguali per intensità se, applicate allo stesso corpo nella *stessa direzione e in sensi opposti*, non modificano lo stato del corpo, ossia se in quelle condizioni si fanno equilibrio.

Con ciò noi ammettiamo che il più semplice sistema equilibrato è formato di due forze *eguali e opposte*. È anche evidente che due forze le potremo ritenere eguali se fatte successivamente agire nelle stesse condizioni sopra un medesimo corpo producono lo *stesso effetto*; ad esempio, se fatte agire per trazione sopra una molla ad elica (fig. 23) in direzione dell'asse, producono separatamente nella molla lo stesso allungamento. Ed una data forza la riterremo doppia, tripla, ecc., di un'altra, se fatta agire sopra la detta molla produrrà lo stesso allungamento che producono 2, 3 forze tutte eguali all'altra, agenti insieme.

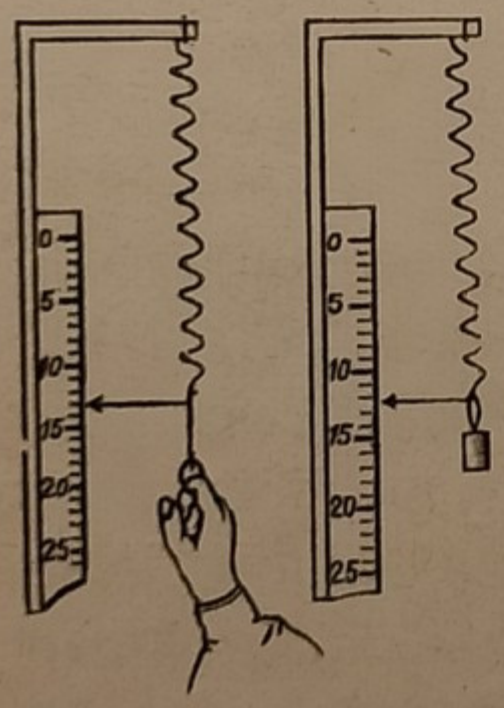

Fig. 23.

Per la misura delle forze fa comodo perciò scegliere senz'altro una determinata forza come *unità*. E come tale si è convenuto di prendere il *grammo*, cioè la forza con cui la Terra attira 1^{cm^3} di acqua distillata a 4° di temperatura (1). Tale è l'*unità*

(1) In verità il *grammo* è la millesima parte del peso che, alla latitudine di 45° e al livello del mare, ha un blocco di platino iridiato

statica, perchè serve alla misura delle forze fondata sopra il criterio dell'equilibrio; più innanzi si parlerà dell'*unità dinamica*.

Riprendiamo allora la molla di cui si è or ora parlato e fissiamone l'estremità superiore alle sommità di una scatola che porta in alto un anello per sospendere l'apparecchio (fig. 24). L'estremità inferiore della molla è unita ad un uncino, al quale viene applicata la forza che si vuol misurare. Un indice, che sporge da una fenditura longitudinale, fissato pure allo estremo inferiore della molla, sporge da una fenditura praticata nella scatola e scorre sopra una scala graduata.

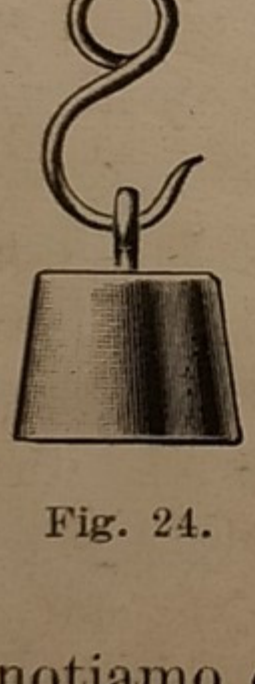

Fig. 24.

Le divisioni e i numeri sono segnati sospendendo all'uncino inferiore dei pesi noti, di 1, 2, 3... kg. Va però notato che l'elasticità della molla varia col tempo, cosicchè sospendendo ad essa dopo qualche tempo dalla graduazione la stessa serie di pesi, si ottengono indicazioni diverse dalle primitive, per cui occorre di tanto in tanto eseguire delle correzioni. L'apparecchio descritto vien chiamato *dinamometro*.

Esso talora serve negli usi comuni anche come bilancia.

Nei laboratori qualche volta ci si serve di un dinamometro con una molla assai lunga per eseguire delle rapide misure di pesi.

Riguardo all'ordine di grandezza di certe forze notiamo che i bastimenti, navi da guerra, ecc., possono pesare parecchie decine di migliaia di tonnellate; una locomotiva da 40 a 60 T.; certe carrozze dei tram pesano vuote 3 T., e col carico di passeggeri al completo 6 T. Una carrozza pubblica pesa da 300 a 500 kg. La Torre Eiffel 8 mila T.

Se poi ci riferiamo agli sforzi esercitati da motori meccanici o animali, si sa che una grossa locomotiva può tirare con

---

che si conserva nell'Ufficio Internazionale di Pesi e Misure di Sèvres; la differenza fra questa unità e quella sopra definita è praticamente trascurabile.

uno sforzo di 6000 kg., un cavallo con uno sforzo medio di 70 kg., un bue con 65 kg., un asino con 14 kg.

Stabilito ciò si capisce facilmente che la forza è una grandezza che è possibile rappresentare *graficamente*; a tale scopo serve un segmento terminato a freccia (fig. 25), l'estremità del quale opposta alla freccia, può rappresentare il punto di applicazione della forza; la direzione e il senso della freccia rappresentano la direzione e il senso della forza e la lunghezza del segmento, l'intensità della forza quando si sia stabilita la scala di rappresentazione, vale a dire la lunghezza del segmento che rappresenta la forza *uno*. Una forza così rappresentata la si nominerà o colle due lettere che sono sugli estremi della freccia, mettendo prima quella che sta sul punto di applicazione, o con la sola lettera che sta sulla freccia.

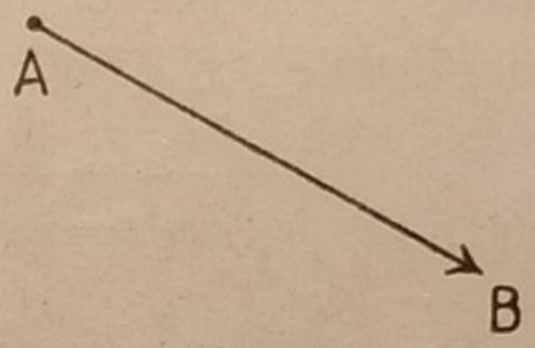

Fig. 25.

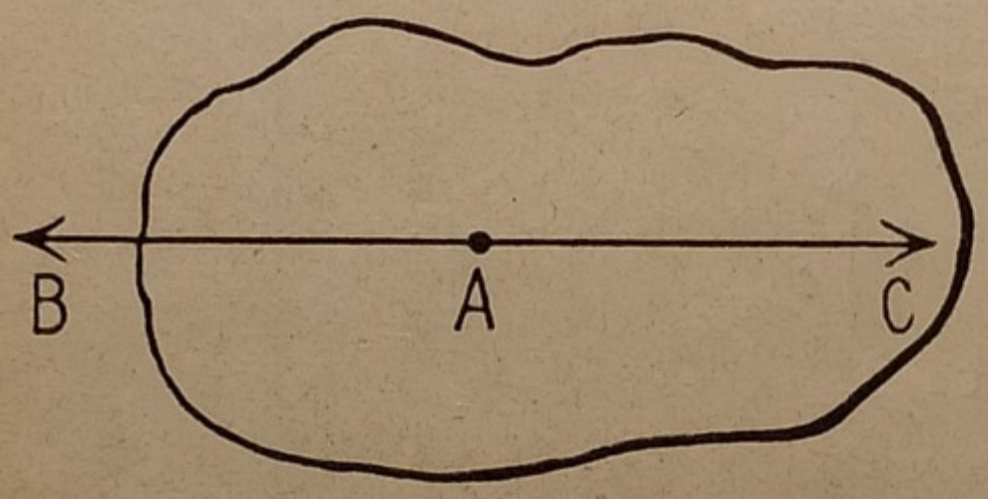

Fig. 26.

10. Equilibrio di forze complanari o comunque concorrenti. — Nel precedente paragrafo è detto che il più semplice sistema di forze in equilibrio è formato di due forze eguali e contrarie AB e AC (fig. 26) applicate allo stesso punto A di un corpo e si fanno anche equilibrio due

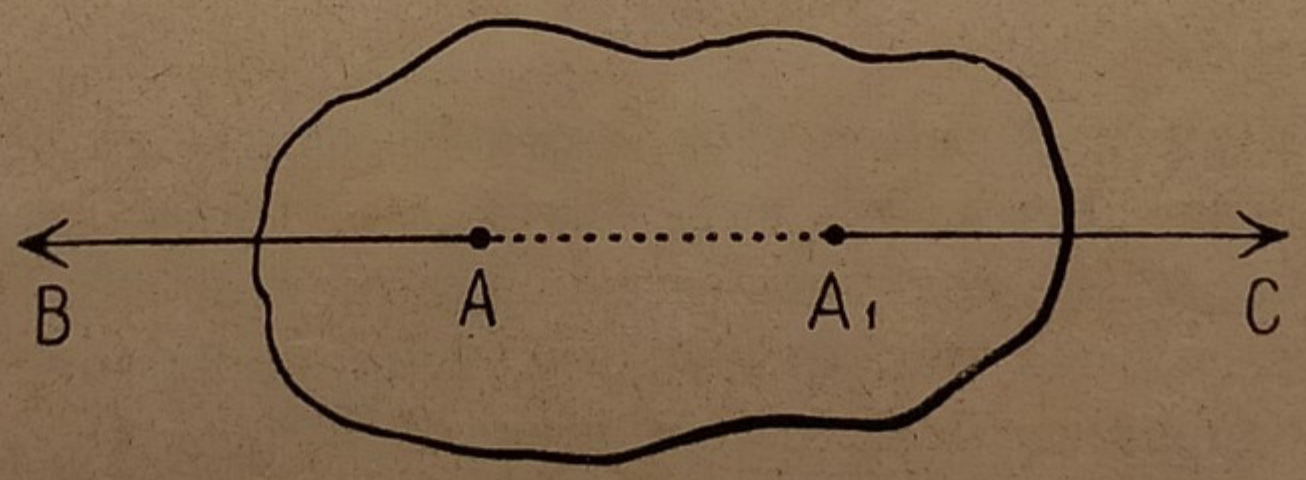

Fig. 27.

forze AB e A_1C (fig. 27) eguali e contrarie agenti in due punti distinti A e A_1 che sono sulla loro direzione. Ma si possono

avere infiniti altri sistemi di forze in equilibrio, dei quali esamineremo i più importanti. Tipico è un sistema di 3 forze complanari applicate a un medesimo punto, realizzabile mediante l'apparecchio schizzato nella figura 28, la quale rappresenta una tavola nera verticale che porta lateralmente verso l'alto due carrucole M ed N. Di tre cordoncini annodati insieme per un

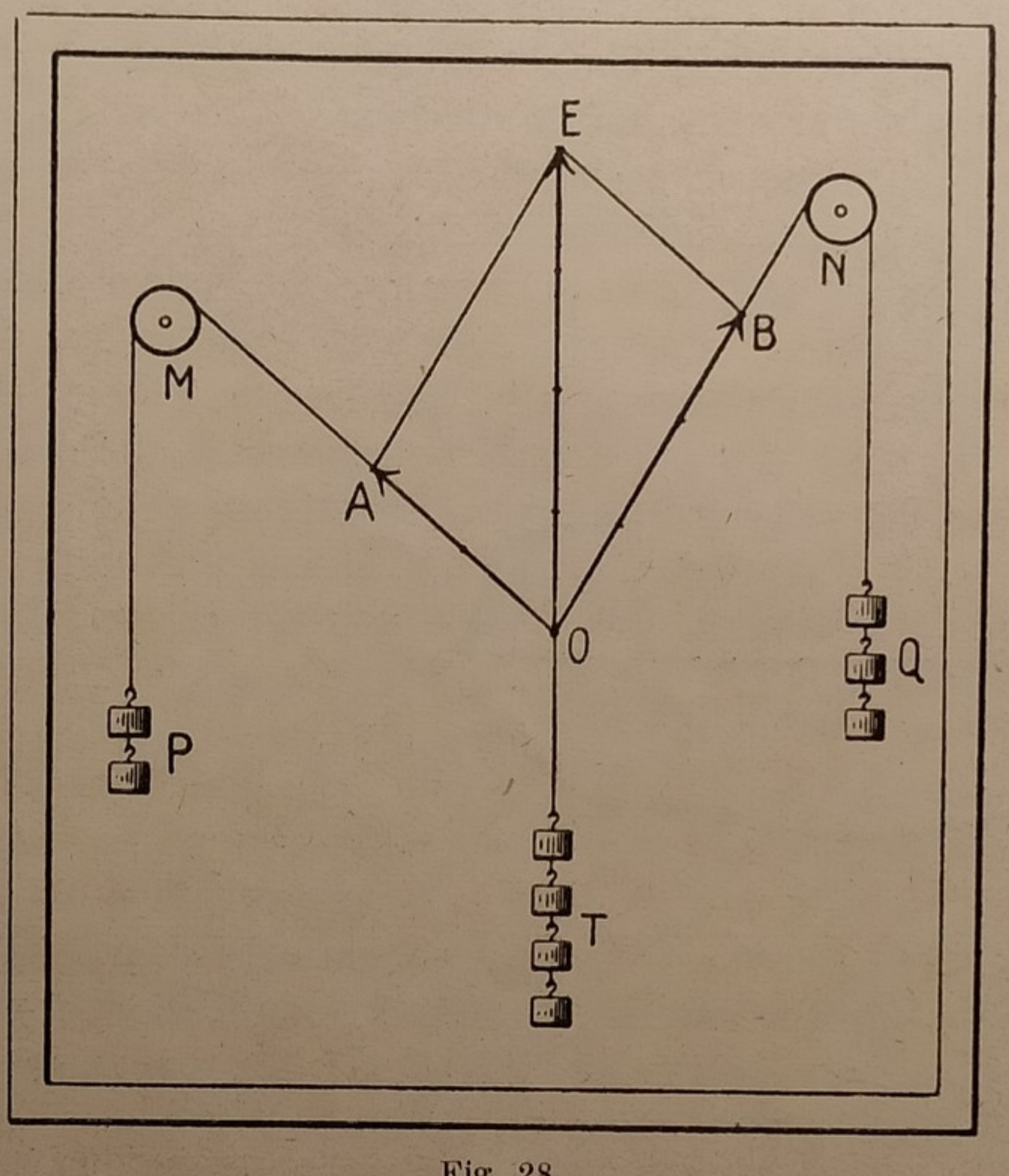

Fig. 28.

estremo O due si fanno passare sopra le carrucole e il terzo si lascia pendere liberamente. Alle estremità dei fili si sospendono tre pesi P, Q, T, che possono essere qualunque subordinatamente alla condizione, che uno qualsiasi sia minore della somma degli altri due e maggiore della loro differenza. In tal modo i cordoncini prendono da per sè delle direzioni convenienti e ne risulta un sistema di tre forze in equilibrio, applicate allo stesso punto O e giacenti nello stesso piano, che nel caso attuale è verticale. Una delle tre forze, per es. la T, può considerarsi come la

equilibrante delle forze P e Q. Or si segnino sulla tavola i segmenti OA e OB in modo da rappresentare le forze P e Q, si costruisca il parallelogrammo che ha per lati OA e OB e si tracci la diagonale OE; si riscontra che questa diagonale è eguale ed opposta al segmento che rappresenta la forza T. La forza rappresentata da OE, che equivale, agli effetti dell'equilibrio, alle forze P e Q, si dice *risultante* delle forze P e Q, rappresentate da OA e OB, dette componenti. Quindi: *la*

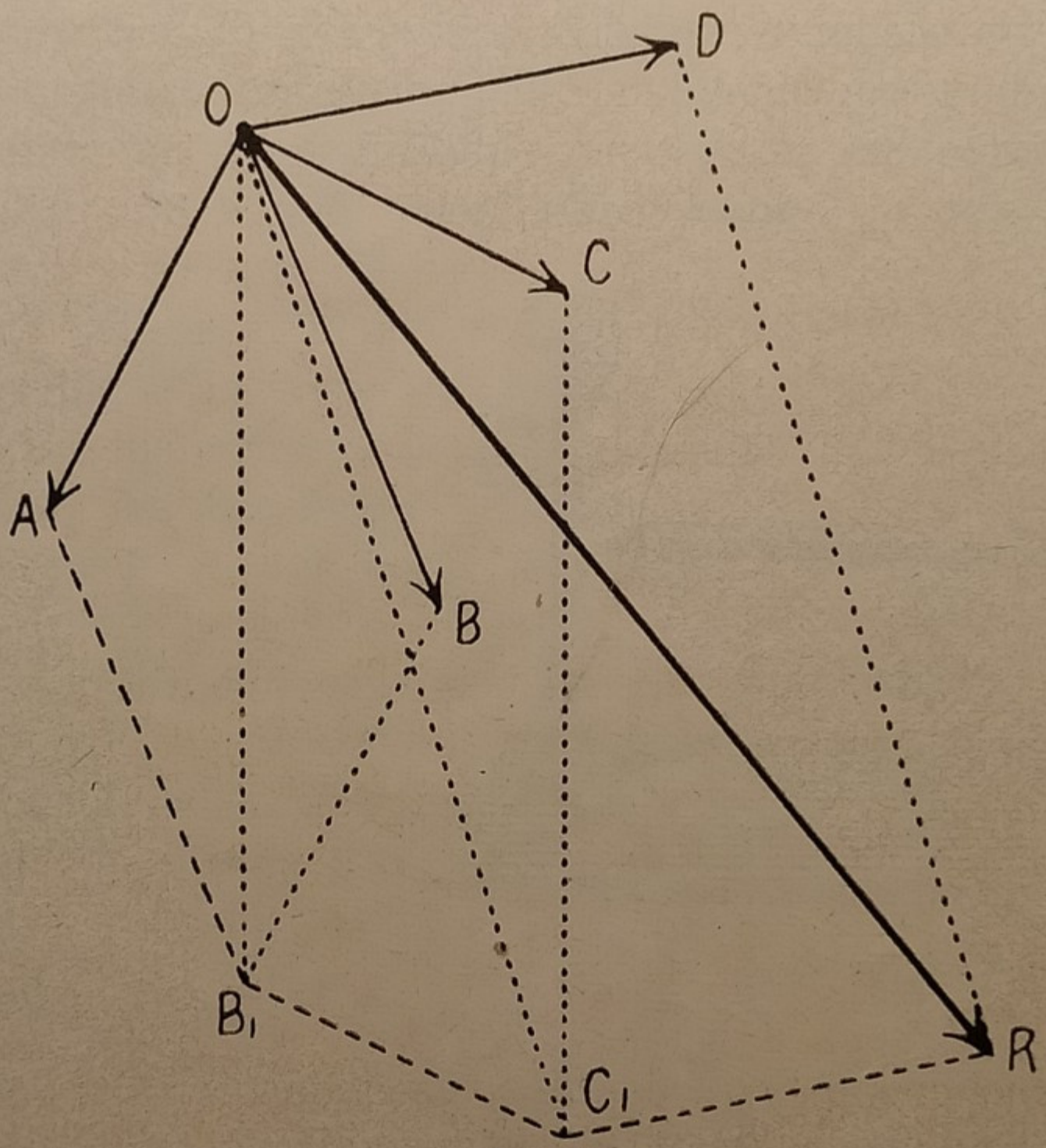

Fig. 29.

risultante di due forze ad angolo applicate allo stesso punto è una forza giacente nel piano delle componenti, applicata nello stesso punto e rappresentata dalla diagonale del parallelogrammo che ha per lati i segmenti rappresentanti le componenti stesse.

Più brevemente si dice anche che *la risultante anzidetta è la diagonale del parallelogrammo costruito sulle componenti.* È questa la nota *regola del parallelogrammo delle forze.* Si tenga poi ben presente che risultante ed equilibrante di un dato sistema di forze sono forze eguali ed opposte.

Un sistema complanare di forze in equilibrio può essere formato anche da un numero di forze superiore a tre.

Si consideri il sistema delle forze complanari A, B, C, D applicate nello stesso punto O (fig. 29). Colla regola del parallelogrammo si tracci la OB_1 risultante delle A e B; poi la OC_1 risultante delle B_1 e C; in ultimo la OR risultante delle C_1 e D, cioè la risultante del sistema dato. La forza eguale e contraria alla R è la equilibrante del sistema.

La figura precedente si adatta anche al caso di un sistema di più forze comunque concorrenti in un punto, anche non complanari.

Realizziamo ora un sistema equilibrato di tre forze parallele. Può servire l'apparecchio della figura 30, formato di un'asta AB sostenuta da due funicelle, che passano su due puleggie, agli estremi delle quali sono attaccati dei pesi $P = 2$ e $Q = 1$. Per tentativi si trova che il sistema viene equilibrato in una unica maniera con un peso $R = 3$ attaccato in un punto C dell'asta, tale che sia:

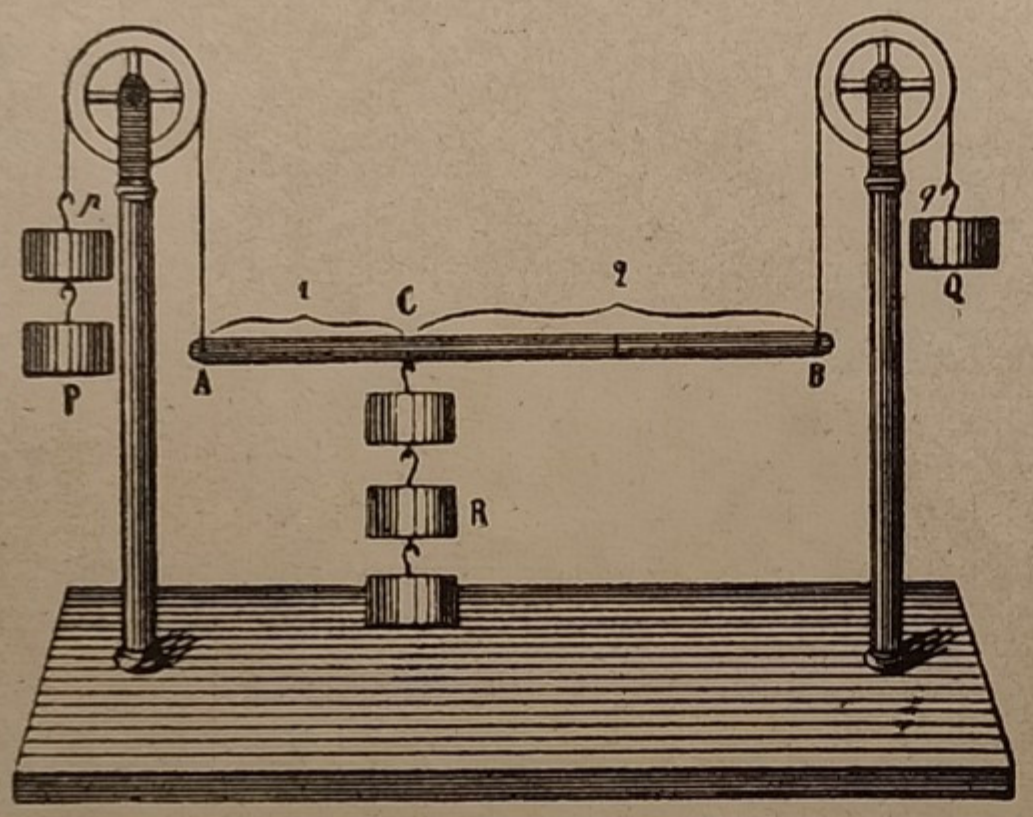

Fig. 30.

$$CA : CB = Q : P .$$

Se si considera R come equilibrante delle P e Q la risultante di queste è una forza eguale e contraria alla R, quindi: *la risultante di due forze parallele P e Q cospiranti, cioè dirette nello stesso verso, è complanare e parallela a queste ed ha lo stesso senso, ha un'intensità eguale alla somma delle intensità delle componenti e il suo punto di applicazione divide le congiungenti i punti di applicazione delle componenti in parti inversamente proporzionali alle intensità di queste.*

Se, diversamente, si considera come equilibrante nel sistema in discussione una delle forze P o Q, per esempio la P, la risultante delle R e Q è la forza eguale e contraria a P; da ciò la regola: *la risultante di due forze parallele contrarie è complanare*

e parallela alle componenti, ha il senso della componente maggiore, intensità eguale alla differenza delle componenti, col punto di applicazione sul prolungamento della congiungente i punti di applicazione delle componenti dalla parte della maggiore, a distanze dai punti di applicazione delle componenti inversamente proporzionali alle stesse. Quest'ultima relazione si deduce dalla (1), dalla quale, applicando il componendo, si ottiene:

$$CA : CA + CB = Q : Q + P ;$$

ma essendo: $Q + P = R$

$$CA : AB = Q : R .$$

Nei casi contemplati abbiamo trovata la risultante di più forze, abbiamo cioè, come si dice, eseguita la *composizione delle forze*.

Non maggiore difficoltà offre la composizione di un numero qualunque di forze parallele.

Sieno F_1, F_2, F_3 più forze componenti parallele e dirette nello stesso senso.

La risultante delle F_1 e F_3 sia R^1; questa, composta con la F_2, dà la risultante cercata R (fig. 31).

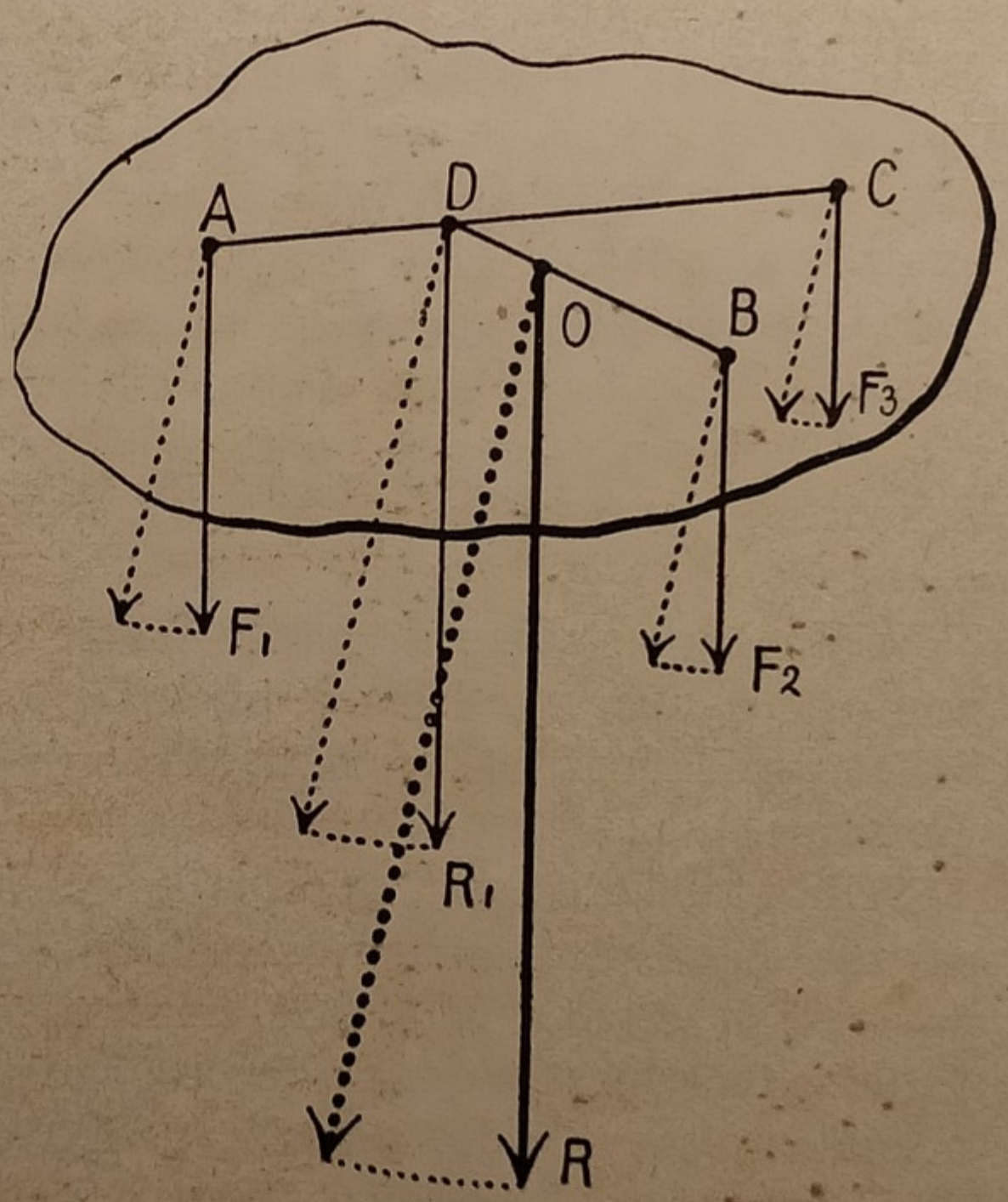

Fig. 31.

La risultante generale è eguale alla somma delle forze date. Il suo punto di applicazione O chiamasi *centro delle forze parallele.*

E poichè il punto D di applicazione della risultante di due forze parallele soddisfa alla nota relazione:

$$\frac{AD}{DC} = \frac{F_3}{F_1},$$

la posizione di questo punto non dipende nè dalla direzione delle componenti, nè dal loro valore assoluto, purchè il rapporto delle loro intensità resti invariato.

I punti di applicazione delle risultanti successive e anche della risultante generale godono della stessa proprietà. *La posizione del centro delle forze parallele resta dunque invariata* quando si faccia variare la comune direzione delle componenti F_1 F_2... e anche quando si alterino tutte le forze in uno stesso rapporto.

11. Decomposizione di una forza in due complanari. — Si può sempre sostituire ad una forza data, due o più forze agenti nello stesso punto. Ma mentre due forze date applicate a un punto ammettono solo una risultante, *la decomposizione di una forza in due è possibile in un numero infinito di modi.* Basta infatti che le due componenti, graficamente rappresentate, formino un *triangolo* colla forza data. Ciascuna delle componenti ottenute può alla sua volta essere ulteriormente decomposta.

La decomposizione di una forza in due agenti nello stesso punto, ha una particolare importanza in certi casi, in cui l'effetto della forza non può manifestarsi che in una determinata direzione.

Nelle stazioni si usa spesso far trainare un vagone da un cavallo che cammina fuori del binario. Nella figura 32 M rappresenta il vagone, HH_1 KK_1 le rotaie, OF la forza esercitata dal cavallo. Questa forza si decompone in due: l'una OA diretta secondo l'asse Ox del binario, l'altra OB nella direzione Oy perpendicolare allo stesso. Quest'ultima non ha alcun effetto per il moto del corpo; essa non fa che premere le ruote del vagone contro la rotaia che sta dalla parte del cavallo, ed è una forza che viene equilibrata dalla contropressione esercitata sulle ruote dalla stessa rotaia.

L'effetto di tale forza a lungo andare si manifesterebbe per il consumo della rotaia e delle ruote che vi premono contro. Ma per il moto del vagone ha solo effetto la componente OA,

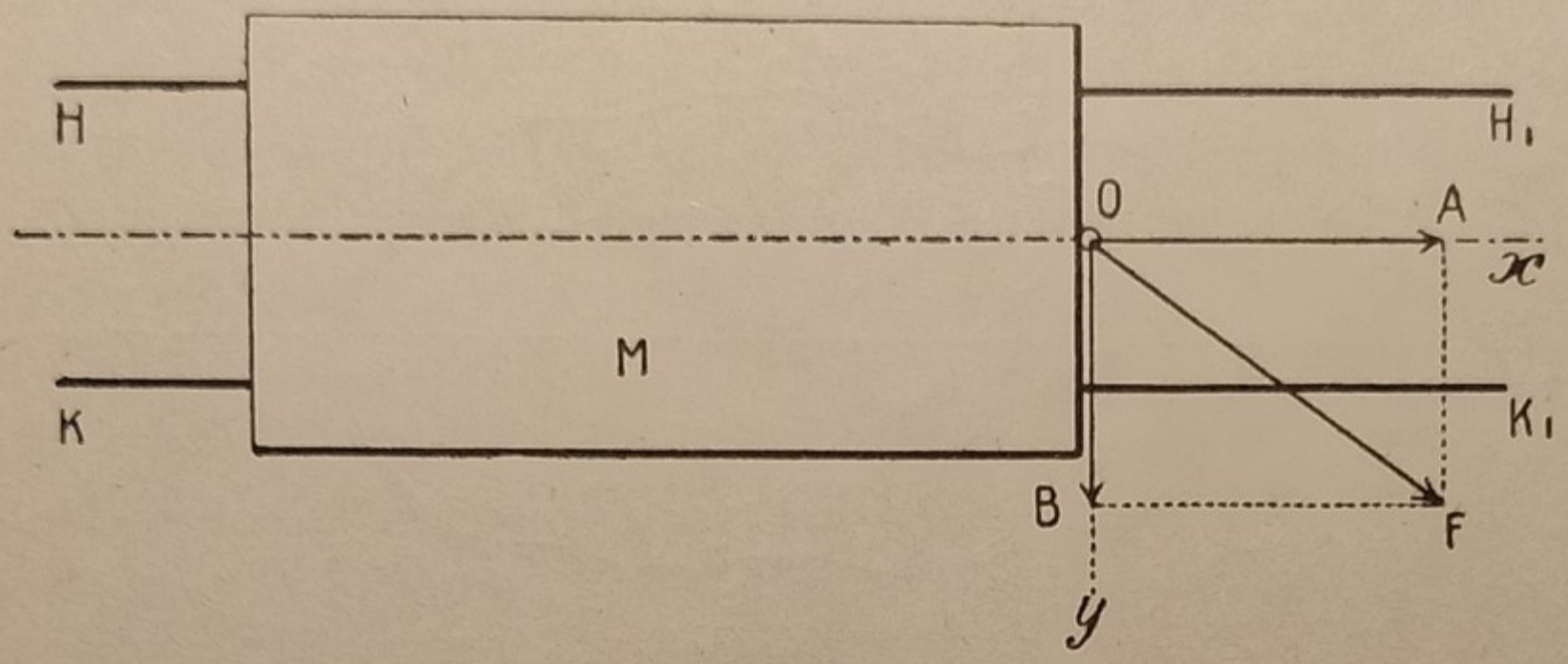

Fig. 32.

che evidentemente ha un valore minore di OF, e tanto minore quanto maggiore è l'angolo AOF; di guisa che il massimo effetto lo si otterrebbe rendendo $AOF = 0$, cioè facendo camminare il cavallo fra le due rotaie e obbligandolo a tirare secondo Ox.

Supponendo $AOF = 30°$ e $OF = 60$ kg. si avrebbe $OB = 30$ kg., e quindi:

$$OA = \sqrt{60^2 - 30^2}$$

ossia:

$$OA = \sqrt{2700} = 52 \text{ kg. circa.}$$

La componente OA si dice anche *componente utile*. Casi analoghi di decomposizione li ritroveremo nel piano inclinato e nel pendolo.

Nella meccanica pratica si verifica anche spesso la decomposizione di una forza in due parallele; ciò avviene, ad esempio, quando un corpo pesante è sostenuto da due appoggi laterali, com'è il caso di un albero di trasmissione che poggia su due o più cuscinetti.

12. Equilibrio di corpi aventi un punto o un asse fisso. — Cominciamo da quest'ultimo caso, che assorbe il primo. Un corpo ha un asse fisso quando può solo assumere un movimento

rotatorio intorno a un asse; tale è il caso di una porta comune, di una puleggia di trasmissione, ecc. Rappresentiamo il corpo girevole con M (fig. 33) e vediamo quali forze agenti *non* producono il movimento del corpo. Una forza come la AP agente

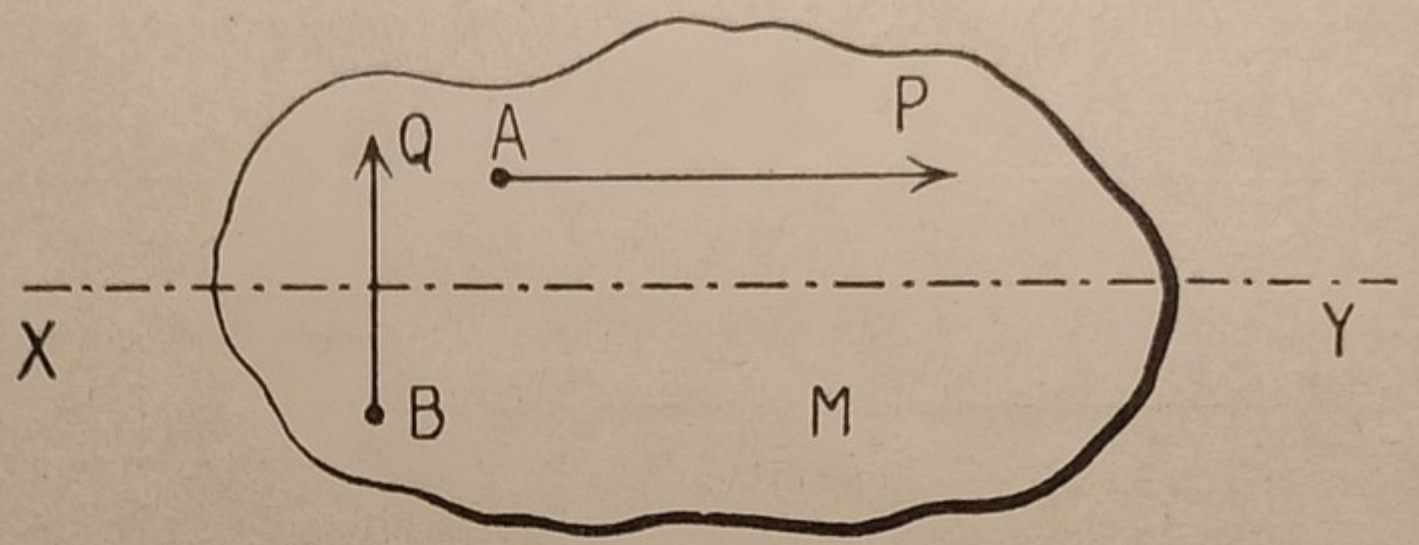

Fig. 33.

parallelamente all'asse, in un punto qualunque A, non ha alcun effetto, poichè essa tende solo a spostare il corpo lungo l'asse, ciò che per ipotesi non è possibile. Analogamente è senza effetto anche la forza BQ che incontra perpendicolarmente l'asse e che tende solo a spostare il corpo trasversalmente.

Per conseguenza è senza effetto qualunque forza che giace in uno stesso piano coll'asse: infatti tal forza può decomporsi in due, agenti nello stesso punto e nel piano individuato dalla forza data e dall'asse, l'una parallela all'asse, l'altra tagliante l'asse perpendicolarmente. Tali componenti per le considerazioni fatte sono inefficaci per il moto del corpo.

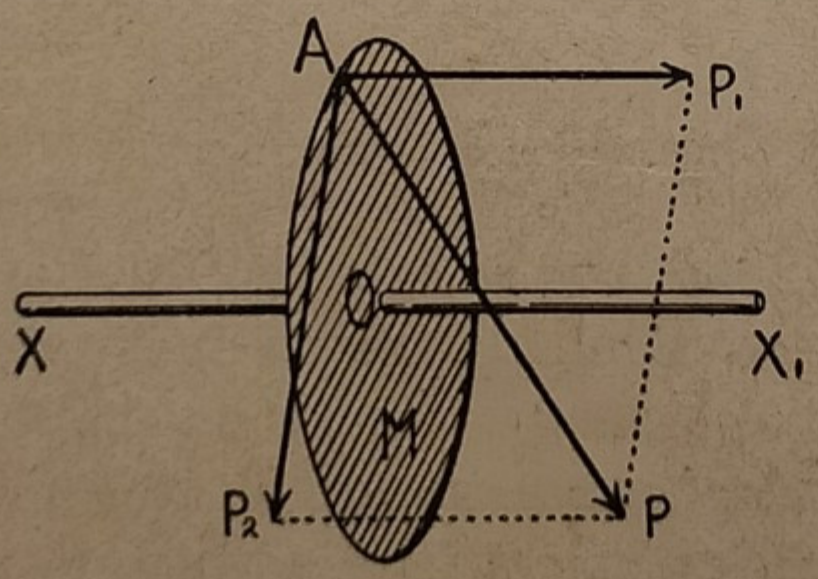

Fig. 34.

Cosicchè, riassumendo, *sopra un corpo girevole intorno ad un asse non produce effetto qualunque forza che giace coll'asse in uno stesso piano.*

Vediamo ora il comportamento di una forza che non si trovi in tal condizione. Per semplicità di rappresentazione si abbia una ruota o un disco M (fig. 34) girevole intorno al proprio asse XX_1 soggetto a una forza AP che *non incontri* l'asse; la figura è prospettica. Decomponiamo tal forza nelle due AP_1 AP_2,

la prima parallela all'asse, l'altra posta sul piano del disco, cioè in un piano perpendicolare all'asse. Quest'ultima non passa per O, poichè, per ipotesi, la forza data AP non è in uno stesso piano coll'asse. La prima non ha, per quanto sopra si disse, alcun effetto; per cui, se c'è rotazione, questa compete solo alla componente AP_2.

Rappresentiamo il disco in parola sul piano del foglio (fig. 35); allora il suo centro O rappresenta la traccia dell'asse, che va inteso perpendicolare al piano del foglio nel punto O. Si comprende che la componente AP_2 produce una rotazione nel senso contrario delle lancette di un orologio.

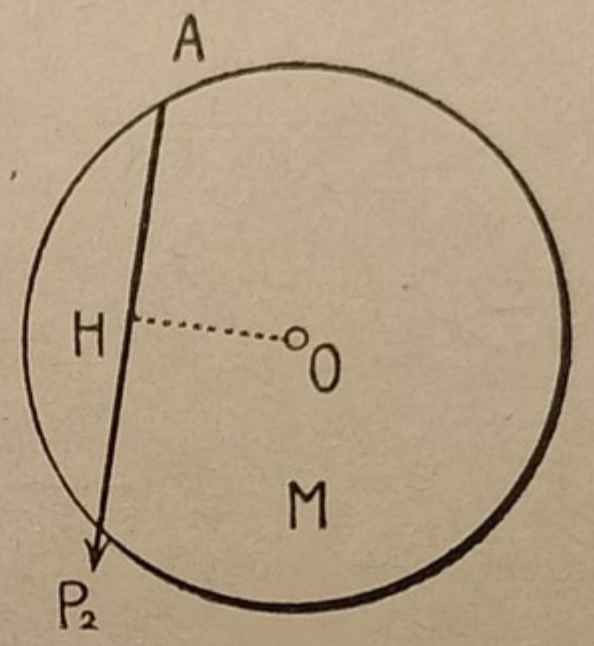

Fig. 35.

Vogliamo ora dimostrare che l'effetto di rotazione della forza AP_2 dipende non soltanto dalla sua intensità, ma anche dal suo *braccio*, cioè dalla sua distanza OH dal punto O, e precisamente che il suo effetto di rotazione può ritenersi misurato dal *prodotto* $AP_2 \times OH$ *della intensità della forza per il suo braccio*, o, come si dice, dal suo *momento* rispetto all'asse.

Ciò noi riterremo dimostrato se riusciremo a provare che due forze agenti sopra un corpo girevole e giacenti in piano perpendicolare all'asse di rotazione, si fanno equilibrio se hanno rispetto all'asse momenti eguali e di segno *contrario*, cioè se tendono a produrre rotazioni opposte.

La verifica si ottiene con l'apparecchio della figura 36; un regolo AB ha nel suo punto di mezzo un pernio ad esso perpendicolare che si può infilare nella staffa C. Il regolo è diviso in parti eguali ed a ciascun punto di divisione si trova un gancio per attaccarvi dei pesi. Alla distanza di 4 divisioni dall'asse sospendiamo un peso D, e un peso eguale E a 4 divisioni dalla parte opposta; riscontreremo che si verifica l'equilibrio (fig. 36 *a*). Sospendiamo in un secondo tempo un peso di 250 grammi alla divisione 4ª di sinistra; l'equilibrio si ottiene sospendendo un peso di 500 grammi alla divisione 2ª di destra (fig. 36 *b*). Vediamo cioè che ha luogo l'equilibrio con due pesi attaccati

dalle parti opposte dell'asse, quando sia costante il prodotto di ciascun peso per la sua distanza dall'asse medesimo, cioè quando i due pesi hanno rispetto all'asse momenti eguali e di segno contrario. Si ha equilibrio anche nel caso della fig. 36 *c*, nella quale un peso è attaccato al gancio che corrisponde al-

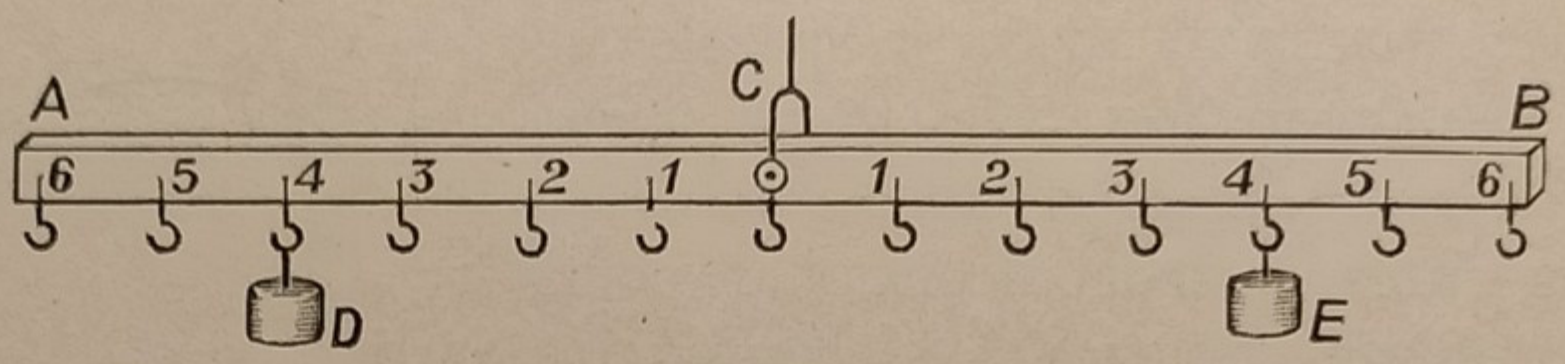

Fig. 36 *a*.

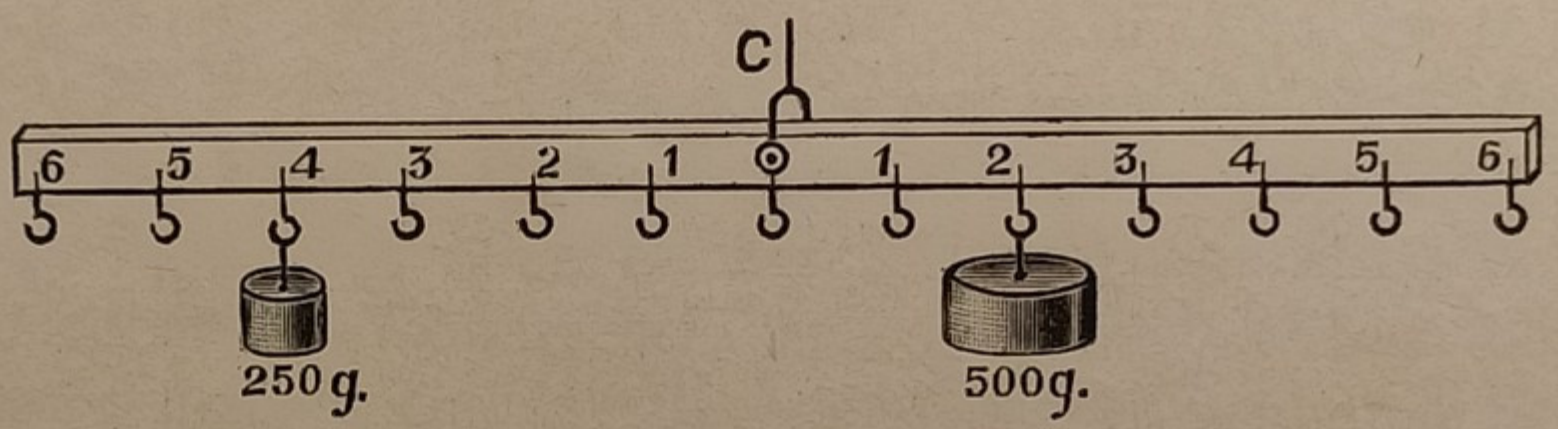

Fig. 36 *b*.

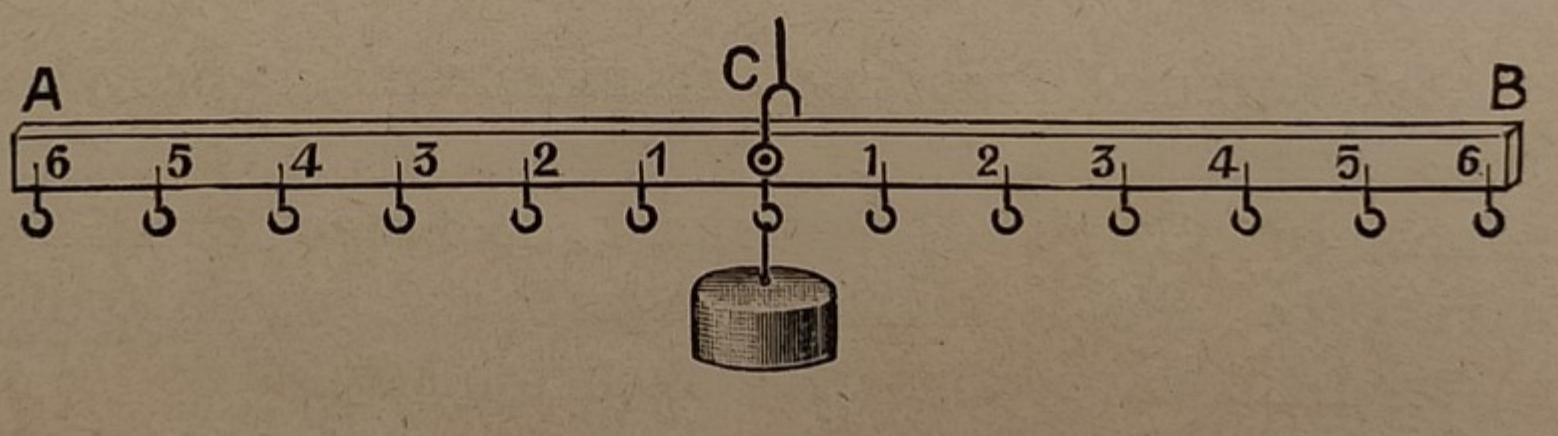

Fig. 36 *c*.

l'asse; perchè in questo caso il suo momento è zero, essendo zero il braccio d'azione.

Se il corpo in questione ha un punto fisso, lo si può ritenere mobile intorno a qualunque asse che passa per quel punto, quindi l'equilibrio si verifica se è nulla la somma algebrica dei momenti delle forze rispetto al punto fisso. I bracci delle forze sono in questo caso le distanze del punto fisso dalle loro direzioni.

13. Coppia. — *È un sistema di due forze AP, BQ* (fig. 37) *parallele, dirette in senso contrario e di eguale intensità.* Il sistema non ammette alcuna equilibrante, e non ha quindi nemmeno risultante, cioè non esiste una forza che può sostituire una coppia. Questa non imprime, come una forza, un moto traslatorio al corpo, ma lo fa ruotare attorno ad un asse perpendicolare al piano delle sue forze, fino a che la linea *AB* dei punti di applicazione abbia preso la direzione delle forze; allora le due forze, risultando opposte, si fanno equilibrio.

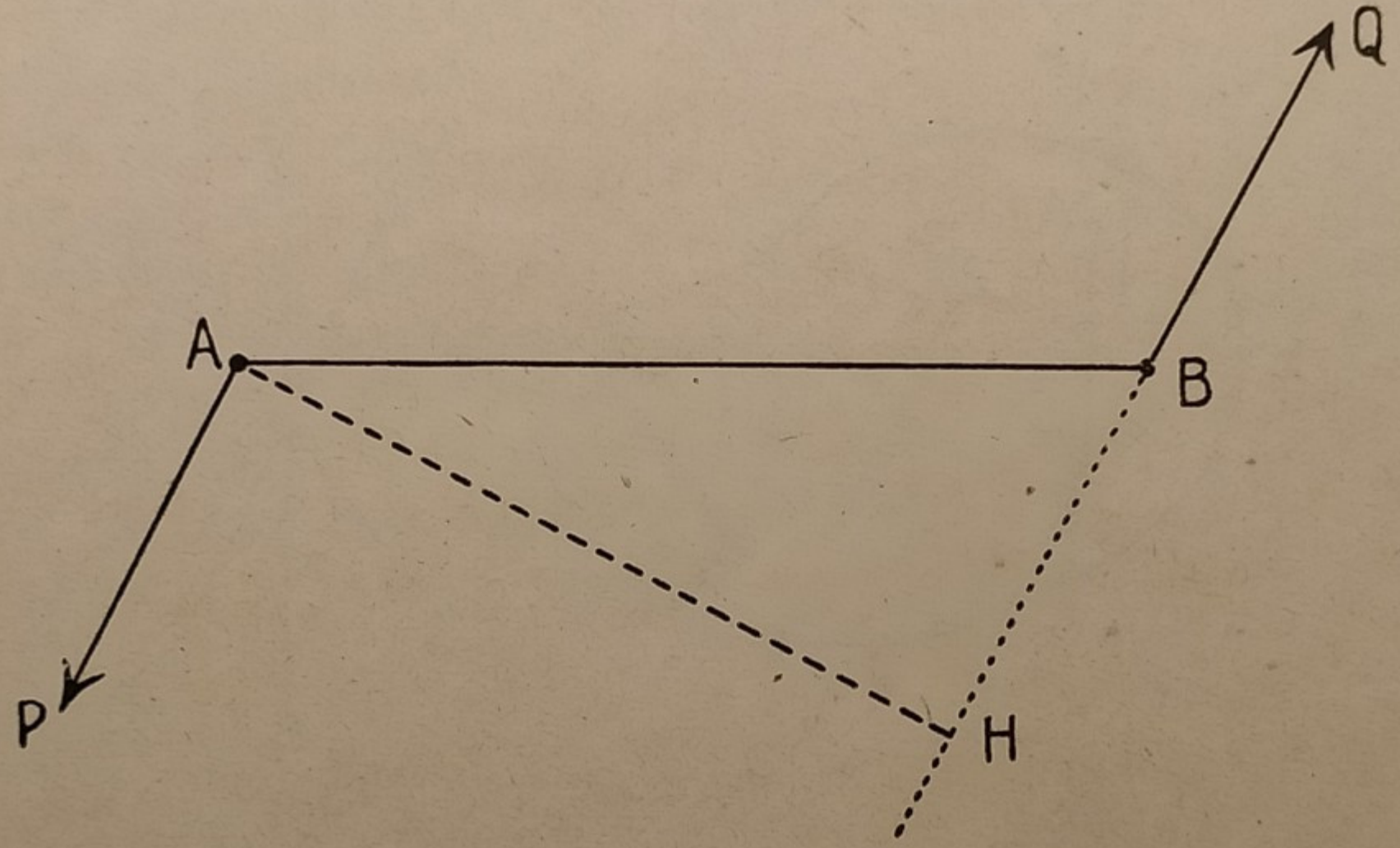

Fig. 37.

Una coppia è caratterizzata dal suo *piano*, il piano delle sue forze; dal *senso della rotazione* e dal suo *momento*. Il momento d'una coppia è il *prodotto della intensità delle forze per il braccio*, che è *la distanza AH delle due forze*. Il momento d'una coppia misura il *valore* della coppia, ossia l'importanza che essa ha per produrre la rotazione; infatti si dimostra che una coppia può essere sostituita da un'altra, situata nello stesso piano o in un piano parallelo, dello stesso senso di rotazione e dello stesso momento. Da ciò anche risulta che due coppie, situate nello stesso piano o in piani paralleli, si fanno equilibrio se hanno momenti eguali e se le loro rotazioni hanno sensi contrari.

Nelle applicazioni industriali si trovano frequentemente delle coppie in azione; i motori rotativi, le turbine ad acqua e a vapore, i motori elettrici sono azionati da coppie. Nel corso del nostro studio incontreremo anche delle coppie in azione; un caso tipico e molto istruttivo è quello dell'ago magnetico della bussola comune, di cui verrà detto nella Magnetostatica.

14. Equilibrio di forze comunque disposte. — Un sistema qualunque di forze si può sempre ridurre a un'unica forza e a un'unica coppia. Si considerino infatti le forze $P\ Q\ S$ (fig. 38)

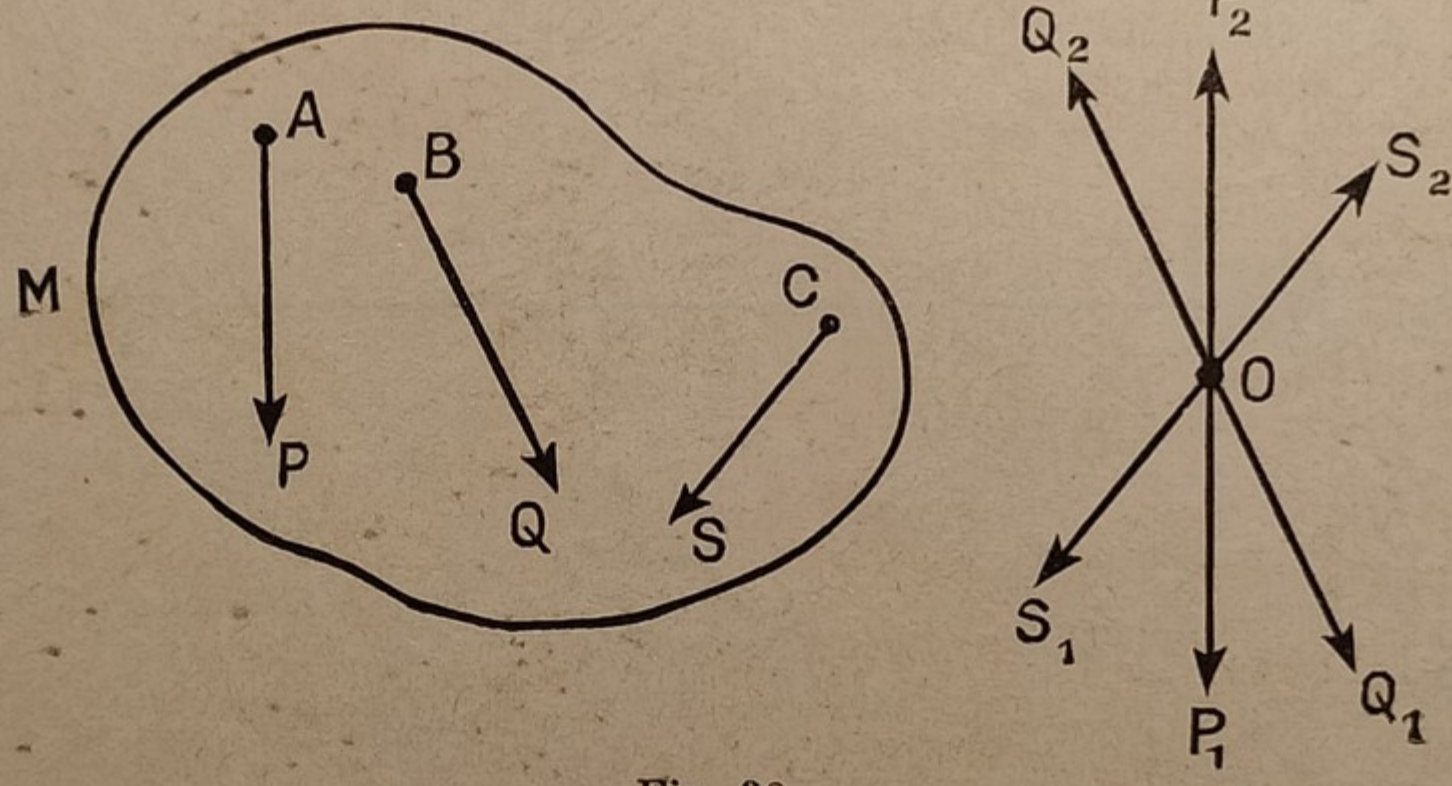

Fig. 38.

comunque dirette e applicate nei punti $A\ B\ C$ di un corpo rigido M, vale a dire di un corpo ideale formato di molecole talmente legate le une alle altre da conservare inalterate le loro mutue distanze. Si prenda un punto O nel corpo o fuori, non importa, purchè rigidamente unito ad esso, ed in quel punto si applichino dei sistemi equilibrati $P_1 P_2$, $Q_1 Q_2$, $S_1 S_2$, ciascuno formato di due forze eguali e contrarie di intensità rispettivamente eguali e parallele alle forze date $P\ Q\ S$. L'aggiunta di tali sistemi non altera evidentemente lo stato del corpo M. Ora si osservi che le forze PP_2, QQ_2, SS_2 costituiscono delle coppie, e le $P_1\ Q_1\ S_1$ sono forze applicate allo stesso punto O. Quest'ultime ammettono un'unica risultante, e le coppie nominate, in base a uno studio, che noi ommettiamo, sulla composizione delle coppie, si compongono in un'unica coppia. Di modo

che *un sistema qualunque di forze applicate a un corpo rigido si può sempre ridurre a un'unica forza e a un'unica coppia.* E il corpo sarà in equilibrio se è nulla la risultante e nullo il momento della coppia.

15. Gravità; baricentro; equilibrio dei gravi. — La *gravità* è la forza che determina la caduta dei corpi. Ogni corpo ha un *peso*, che è la forza di gravità particolare a cui è soggetto. Al § 3 si è accennato alla forza di gravità e ne abbiamo determinata mediante il piombino la direzione, che è *verticale*, cioè perpendicolare alla superficie delle acque stagnanti.

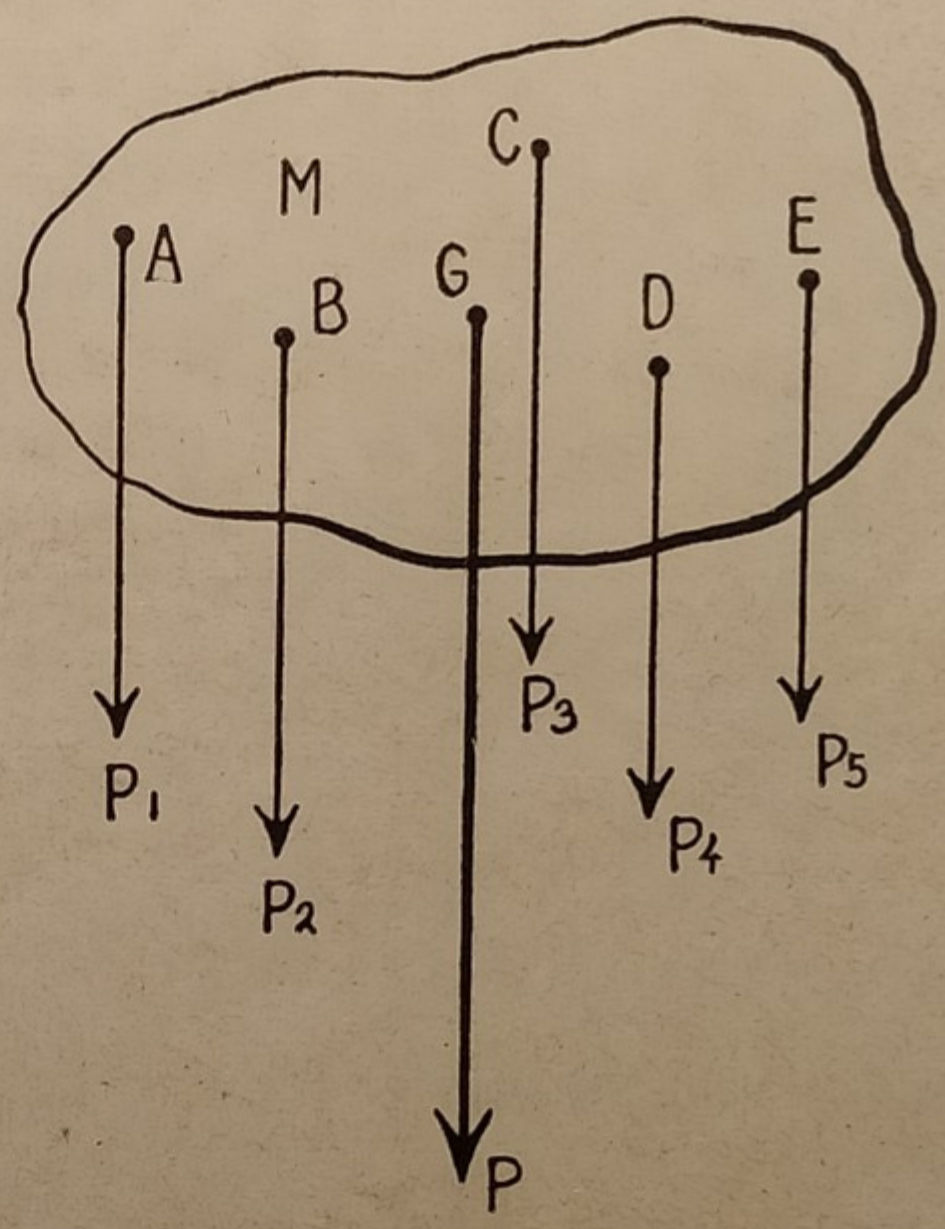

Fig. 39.

In un corpo M (fig. 39) sono pesanti le singole molecole, ciascuna delle quali è soggetta a una forza verticale AP_1, BP_2, CP_3,... Queste forze concorrono veramente nel centro della Terra, ma il raggio di questa è così grande rispetto alle dimensioni dei corpi, sui quali noi operiamo, da poter ritenere che si incontrino a distanza infinita (1). Due fili a piombo attaccati alla cupola di S. Pietro, alta circa 130^m, alla distanza di 1^m, in vicinanza del pavimento sarebbero più vicini di poco più di due centesimi di millimetro. Senza errore sensibile possiamo dunque riguardare come forze parallele i pesi P_1, P_2, P_3... delle molecole di un corpo, il loro centro G (10) ne è

(1) L'angolo di due verticali condotte per due punti della superficie terrestre distanti 1 km. è circa mezzo primo, precisamente $\frac{360 \times 60}{40000} = \frac{27}{50}$ di primo, ossia $0^o.\ 0'.\ 32'',\ 4$; ciò deriva ricordando che la circonferenza massima terrestre è di circa 40.000 km.

il *centro di gravità* o *baricentro*, e la loro risultante P, diretta verticalmente dall'alto in basso, che è la somma dei pesi delle singole molecole, è il *peso del corpo*.

Da tutto ciò risulta che ogni corpo possiede un centro di gravità unico e in posizione invariabile rispetto agli altri suoi punti, se il corpo è rigido; di guisa che, se il corpo si sposta nello spazio o gira su se stesso, è precisamente come se il corpo rimanesse fermo e i pesi delle sue molecole, mantenendosi paralleli, venissero a girare attorno a quei punti.

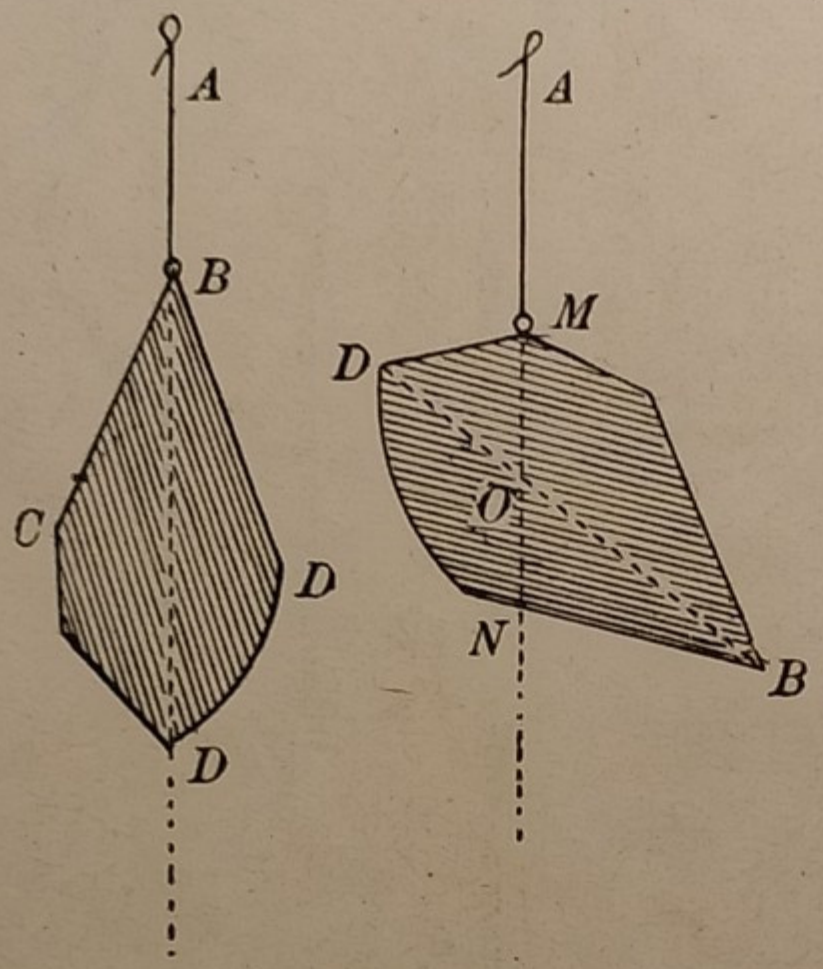

Fig. 40.

Cosicchè, nel trattare dell'equilibrio di un corpo pesante, si potrà considerare il corpo come soggetto a un'unica forza, *il suo peso, applicata nel centro di gravità, ed agente in direzione verticale dall'alto in basso.*

Se un corpo (fig. 40) sospeso a un filo A per un punto B rimane in quiete, vuol dire che il prolungamento del filo passa per il suo centro di gravità; se poi sospendiamo lo stesso corpo per un altro punto M, il centro di gravità dovrà sempre trovarsi sul prolungamento del filo medesimo; quindi abbiamo un metodo sperimentale per determinare il centro di gravità di un corpo qualunque, rintracciando il punto O d'incontro dei due prolungamenti BD e MN.

Tale metodo, che comunemente si dice metodo *sperimentale* per la ricerca del centro di gravità, si può applicare solo a quei corpi cavi, lamellari e simili, nei quali si possa segnare, sì che ne resti traccia, il prolungamento del filo di sospensione; perciò ha maggiore importanza, anche per le applicazioni, il metodo *razionale*, sebbene questo valga limitatamente per i corpi omogenei e che hanno certe forme geometriche. A proposito, ci limitiamo a riferire i principali risultati:

a) due elementi pesanti uguali, riuniti da un legame rigido senza peso, hanno il centro di gravità alla metà della loro distanza;

b) un segmento pesante ha il centro di gravità nel suo punto di mezzo;

c) un triangolo ha il centro di gravità nel punto di incontro delle tre mediane;

d) il cerchio e la sfera nel centro geometrico;

e) la piramide e il cono hanno il centro di gravità sulla congiungente il vertice col centro di gravità della base, a tre quarti della detta congiungente a partire dal vertice;

f) il prisma e il cilindro a basi parallele, nel punto di mezzo della congiungente i centri di gravità delle basi.

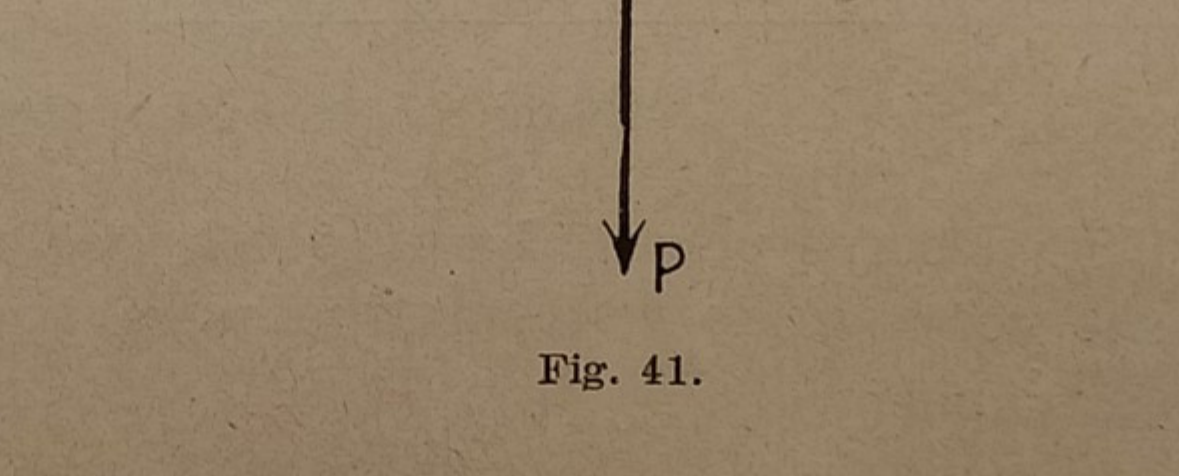

Fig. 41.

Se poi si tratta di due corpi distinti A e B (fig. 41) rigidamente collegati, i pesi dei quali siano P_1 e P_2 e i centri di gravità $G_1 G_2$, il sistema ha il centro di gravità in G determinato con la regola della composizione di due forze parallele cospiranti (10).

Per lo studio dell'equilibrio di un corpo pesante *girevole intorno ad un asse*, sono applicabili i principî generali stabiliti al § 12, tenendo presente che l'azione della gravità si riduce a quello d'una forza eguale al peso del corpo e agente nel suo centro di gravità in direzione verticale.

L'equilibrio quindi ha luogo quando la direzione della forza agente — il peso del corpo — e l'asse di rotazione sieno complanari.

Or se l'asse è verticale, questa condizione è soddisfatta per qualunque posizione del corpo. È il caso che si verifica nelle

imposte delle porte e delle finestre (fig. 42). In tali corpi il centro di gravità G coincide approssimativamente col centro di figura; e l'equilibrio è sempre indifferente perchè la complanarità dell'asse di rotazione XY e del peso P è soddisfatta per qualunque posizione del corpo.

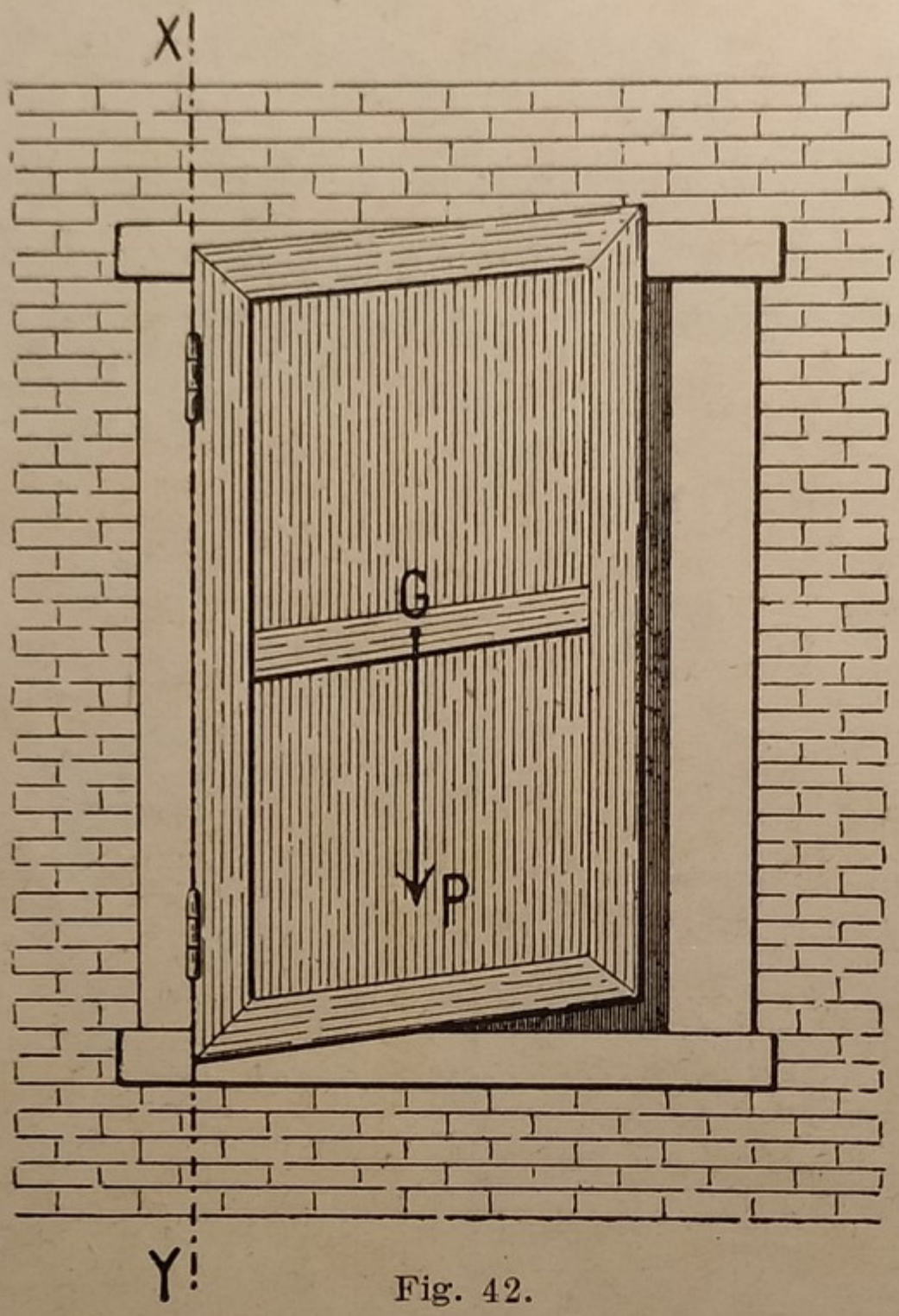

Fig. 42.

Se l'asse non è verticale, la condizione di equilibrio è verificata in tre modi diversi secondo che il centro di gravità è *sotto*, *sopra* o *coincide* coll'asse, e si hanno corrispondentemente le tre forme di equilibrio *stabile* (fig. 43), *instabile* (fig. 44) e *indifferente* (fig. 45).

Se il corpo pesante ha un *punto fisso*, si può ammettere che esso possa girare intorno ad un asse qualunque passante per

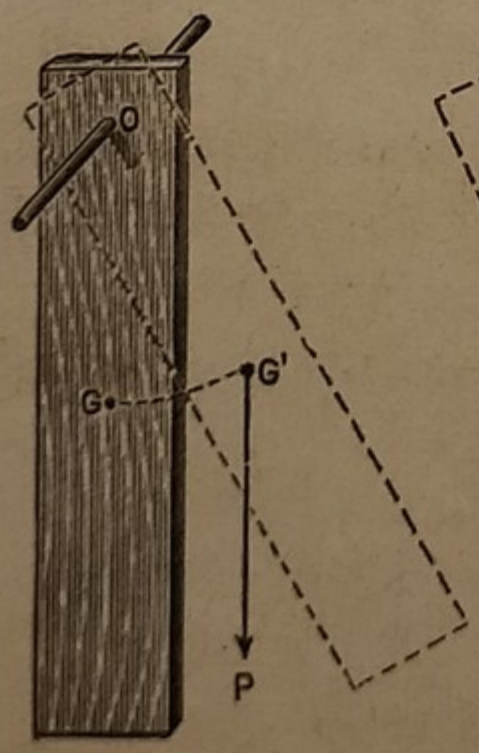

Fig. 43.

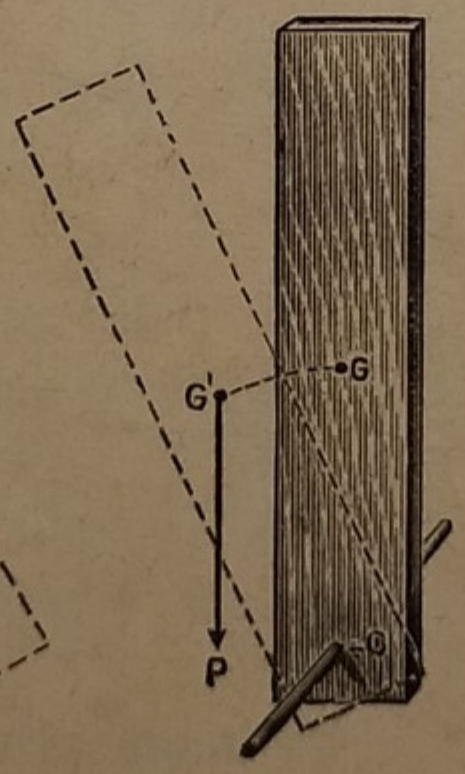

Fig. 44.

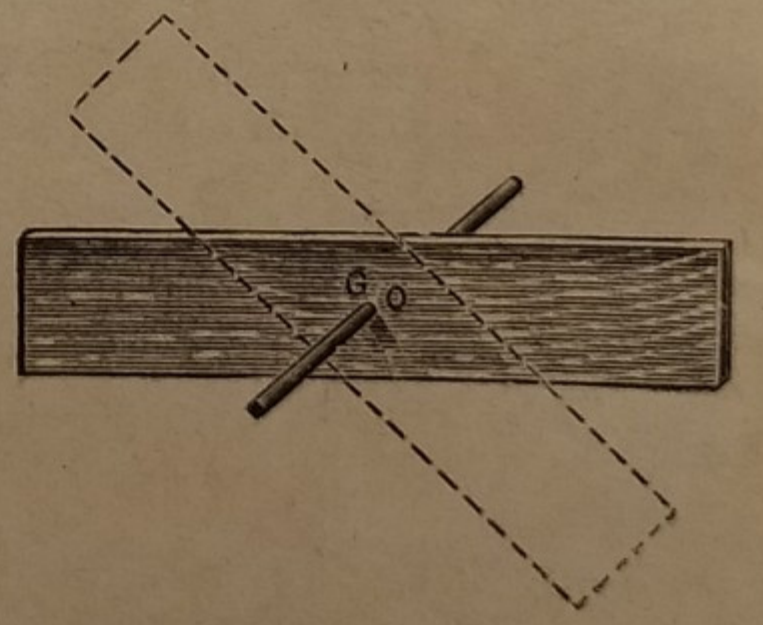

Fig. 45.

quel punto; perciò l'equilibrio ha luogo alla condizione che tal punto si trovi sulla direzione della forza agente sul corpo; in altre parole, alla condizione che il punto fisso e il centro di gravità si trovino sulla stessa verticale. E anche in questo caso si possono verificare le tre condizioni precedenti secondo che il centro di gravità è sotto (fig. 46), sopra (fig. 47), o coincide col punto fisso (fig. 48). Nella figura 46 è rappresentato un cono di ferro attaccato per il vertice ad un polo di una calamita; la 47 mostra un cono poggiante col vertice sopra un piano fisso; nella 48 si ha un anello sospeso a un filo fissato a metà d'una sbarretta diametrale.

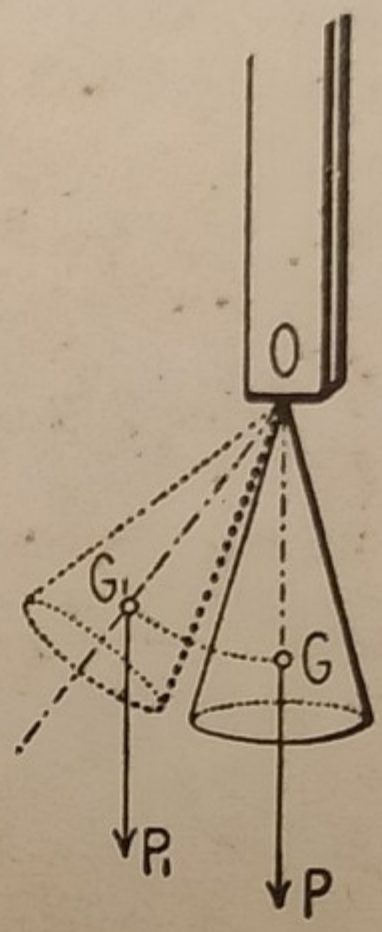

Fig. 46.

E qui crediamo conveniente di spiegare ciò che significano le espressioni equilibrio stabile, instabile, indifferente.

Si dice che un corpo è in equilibrio stabile o instabile quando leggermente spostato dalla sua posizione di equilibrio, tende a ritornarvi sotto l'azione delle forze che lo sollecitano o ad allontanarsene sempre più. E si dice che un corpo è in equilibrio indifferente se spostato dalla posizione in cui si

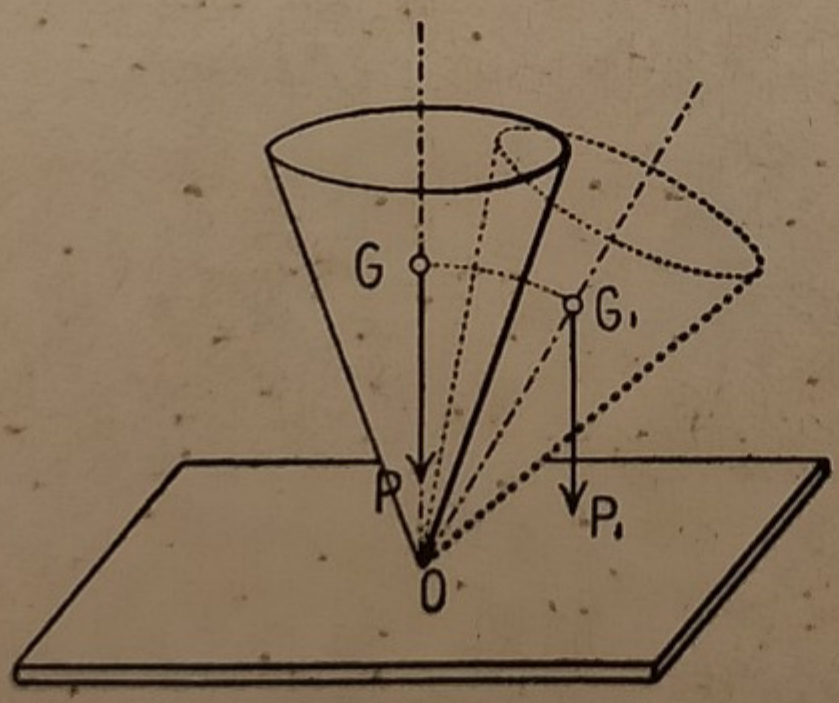

Fig. 47.

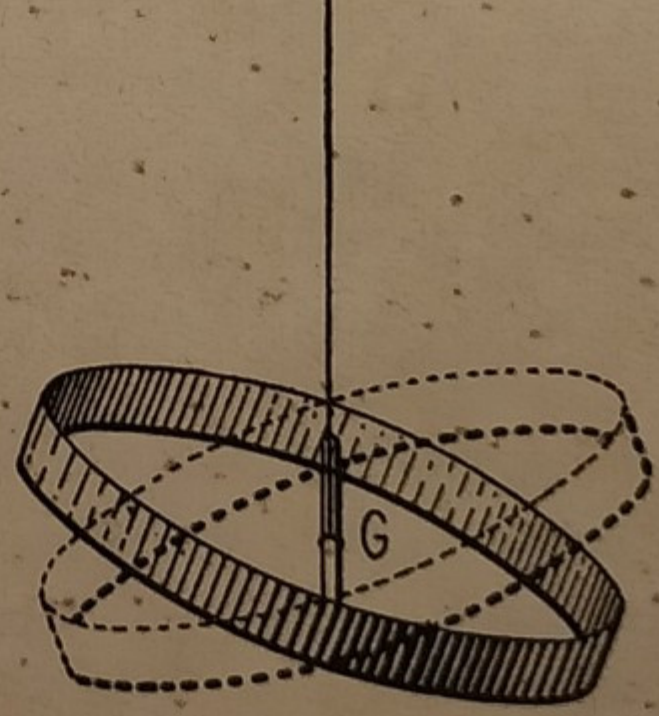

Fig. 48.

trova a un dato istante, rimane in quiete nella nuova posizione.

È utile notare che nei casi illustrati precedentemente, l'equilibrio è stabile se il centro di gravità occupa la posizione infima

consentita dai legami a cui il corpo è soggetto; instabile se la posizione del centro di gravità è la più alta possibile, indifferente se il centro di gravità non può nè sollevarsi nè abbassarsi. Un cono e un cilindro poggianti con una generatrice sopra un piano e una sfera poggiata pure sopra un piano, sono corpi girevoli intorno ad un asse (fig. 49), che comprende il loro centro di gravità, e perciò sono in equilibrio indifferente. Resta ancora a considerare il caso dei corpi pesanti che poggiano con più di due punti, non situati in linea retta, sopra un piano orizzontale.

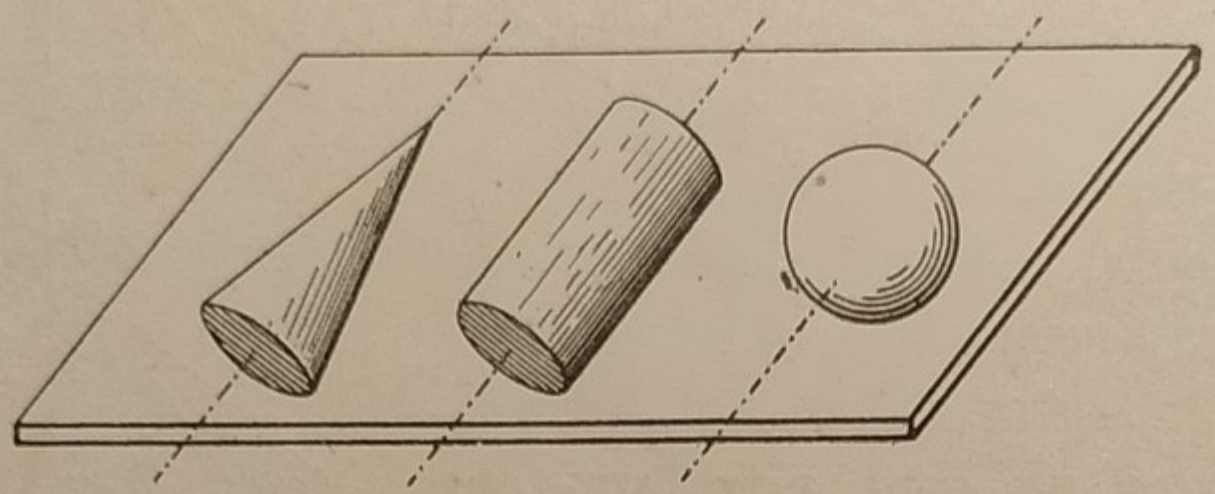

Fig. 49.

In tal caso chiamiamo *base di appoggio* il massimo poligono convesso che si può costruire coi punti che il corpo ha in comune col piano di appoggio.

La condizione di equilibrio è che la verticale del centro di gravità passi dentro la base di appoggio; il peso del corpo in tal caso non fa che premere il corpo contro il piano.

Fig. 50.

Per tal ragione quando noi portiamo un carico (fig. 50), prendiamo tale posizione che la verticale del centro di gravità del sistema formato dal nostro corpo e dal carico cada dentro la base di appoggio formata dai punti di contatto dei piedi col suolo. Per la stessa ragione occorre prendere certe precauzioni nel caricare un carro, quando questo deve percorrere una strada

che pende da un lato (fig. 51). Perchè il carro non ribalti la verticale condotta dal centro di gravità deve incontrare la strada fra le due ruote. In questo caso veramente il piano d'appoggio non è orizzontale, e la condizione precedente non sarebbe sufficiente se gli attriti contro la strada non impedissero lo scivolamento del carro verso il lato più basso della strada stessa.

Corpi pesanti in equilibrio stabile, poggianti su piano orizzontale, sono anche le Torri pendenti di Pisa e di Bologna, nelle quali costruzioni è larga-
mente soddisfatta la condizione sopra enunciata.

L'uomo ritto su due piedi sta bene in equilibrio; ma poggiato sopra un sol piede, l'equilibrio diventa un po' più difficile, e più difficile ancora diventa se tenta di camminare sopra uno stretto travicello o sopra una fune, nei quali casi la base d'appoggio risulta assai stretta.

L'uomo però ritto su due piedi è tra gli animali quello che ha una minore stabilità, per avere una base d'appoggio piuttosto stretta in relazione all'altezza del suo centro di gravità; e ciò spiega perchè i bambini trovano grande difficoltà per reggersi in piedi e camminare.

Fig. 51.

Riassumendo, tutte le condizioni di equilibrio studiate si possono riunire in una sola. Sotto l'azione del peso, che tira il corpo verso il basso, il centro di gravità tende sempre a discendere, sicchè l'equilibrio è tanto più stabile quanto più basso è il centro di gravità.

16. Equilibrio statico di meccanismi semplici: leva, puleggia, asse nella ruota, piano inclinato, cuneo, vite. — L'*equilibrio statico* di un corpo o di una macchina qualsiasi si verifica

quando il corpo o la macchina, sotto l'azione di più forze, sono in quiete, a differenza dell'*equilibrio dinamico* che è uno stato particolare d'una macchina in movimento, come si vedrà più innanzi.

In molti casi pratici occorre o di fare equilibrio a qualche forza detta *resistenza*, o di spostarne il punto di applicazione, di *vincerla*, come si dice, per un certo tratto, valendosi di una altra forza detta *potenza*, la quale può avere intensità diversa dalla resistenza o può non essere opposta a questa. A tale scopo servono le *macchine*, che sono, per così dire, apparecchi intermediari fra le due forze.

Le principali macchine *semplici* sono: *la leva, la puleggia, l'asse nella ruota, il piano inclinato, il cuneo, la vite.*

L'equilibrio in una macchina semplice si può ridurre sempre al caso di due sole forze agenti: la potenza che si adopera per ottenere l'effetto desiderato, e la resistenza che si oppone alla prima.

1) *La leva* è una spranga rigida e senza peso, girevole intorno ad un asse O detto *fulcro* (fig. 52). La potenza P e la resistenza Q si ammette che giacciano in piano perpendicolare all'asse O, per cui segnati i rispettivi bracci OH e OK, l'equilibrio ha luogo (12) quando i momenti di tali forze rispetto al fulcro O, *sieno eguali e di segno contrario*. Si deve avere cioè:

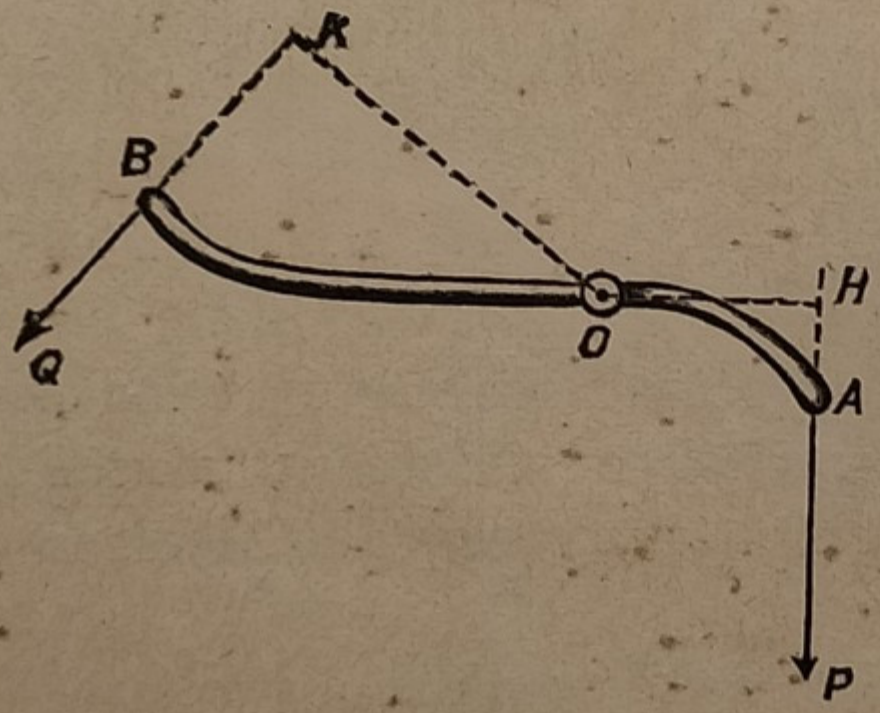

Fig. 52.

$$P \times OH = - Q \times OK ;$$

ossia, tenendo conto dei valori assoluti:

$$P : Q = OK : OH .$$

La leva poi, in relazione alle applicazioni che riceve, si divide in leva di *primo genere* se il fulcro è compreso fra la

potenza e la resistenza (fig. 53), di *secondo genere* se la resistenza è applicata fra il fulcro e la potenza (fig. 54); di *terzo genere*

Fig. 53.

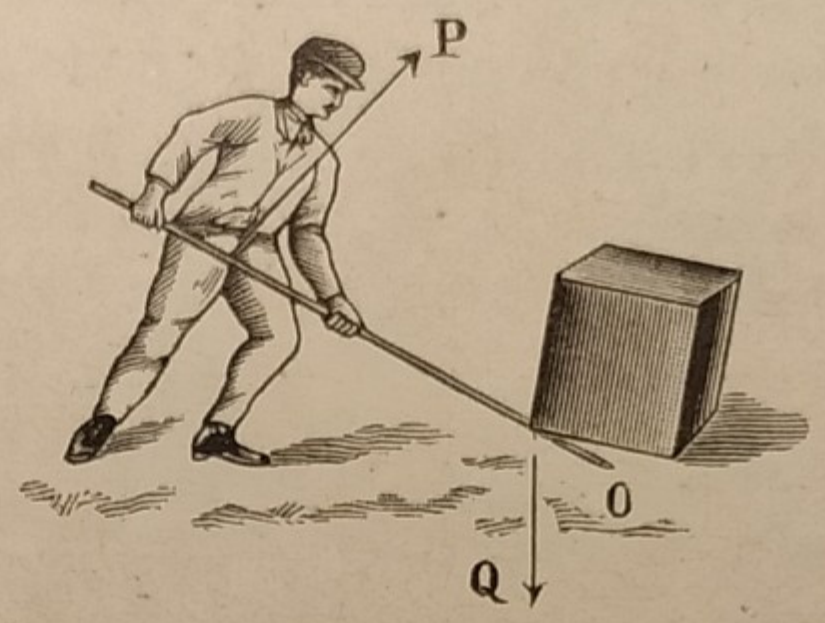

Fig. 54.

se la potenza è compresa fra il fulcro e la resistenza. Ma in tutti i casi l'equilibrio è verificato quando è soddisfatta la condizione espressa nell'ultima equazione.

2) *La puleggia* è una ruota che porta sulla periferia una scanalatura, detta *gola*, imperniata dentro un pezzo ad **U** rovesciato detto *staffa*. Si distingue in *fissa* e *mobile*. Nella puleggia fissa (fig. 55) la potenza e la resistenza agiscono sui tratti della fune avvolta sulla gola e l'equilibrio ha luogo solo se la potenza è eguale alla resistenza. Ciò in base alla teoria dell'equilibrio dei corpi girevoli (12): in questo caso infatti le forze agiscono con bracci eguali, che sono raggi della stessa ruota, e per conseguenza dovendo avere momenti eguali devono avere la stessa intensità.

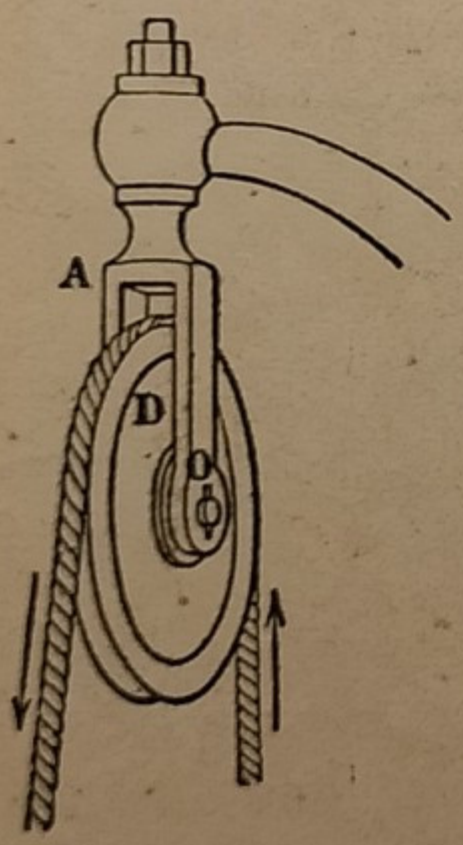

Fig. 55.

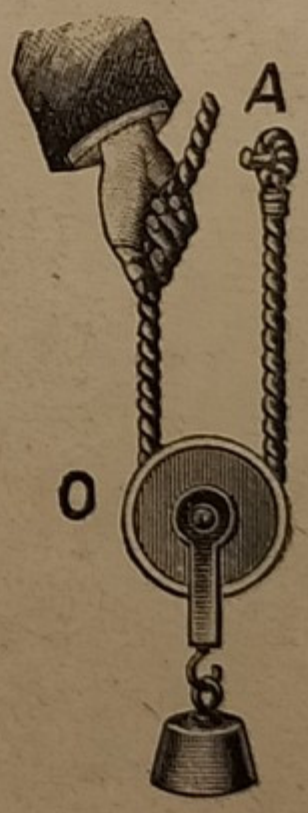

Fig. 56.

Nella puleggia *mobile*, cioè a staffa mobile, consideriamo solo il caso in cui i due *tratti di fune sono paralleli* (fig. 56). Un capo della fune è fissato in *A*; all'altro è applicata la potenza. La resistenza agisce sulla staffa ed è quindi parallela ai due

tratti di fune. In questo caso la puleggia tende a girare intorno al punto *O* in cui si appoggia al tratto fisso della fune e si può quindi considerare come una leva di secondo genere, avente per braccio della potenza il diametro della ruota e per braccio della resistenza il raggio della ruota stessa. Per l'equilibrio occorre dunque che la potenza stia alla resistenza come 1 : 2, ossia che *la potenza sia metà della resistenza.*

3) *L'asse nella ruota*, è detto anche *tornio*, e in pratica *verricello* od *argano*. È formato di un cilindro e di una ruota uniti solidamente e girevoli intorno all'asse comune.

La figura 57 mostra la macchina prospetticamente. La potenza *P* è applicata ad una fune avvolta sulla ruota, la resistenza *Q* agisce per mezzo di una fune avvolta in senso inverso sul cilindro, sì che le due forze tendono a imprimere alla macchina rotazioni di senso contrario. La condizione di equilibrio apparisce chiaramente dando uno sguardo alla figura 58 che rappresenta la macchina proiettata sopra un piano perpendicolare all'asse di rotazione *O*.

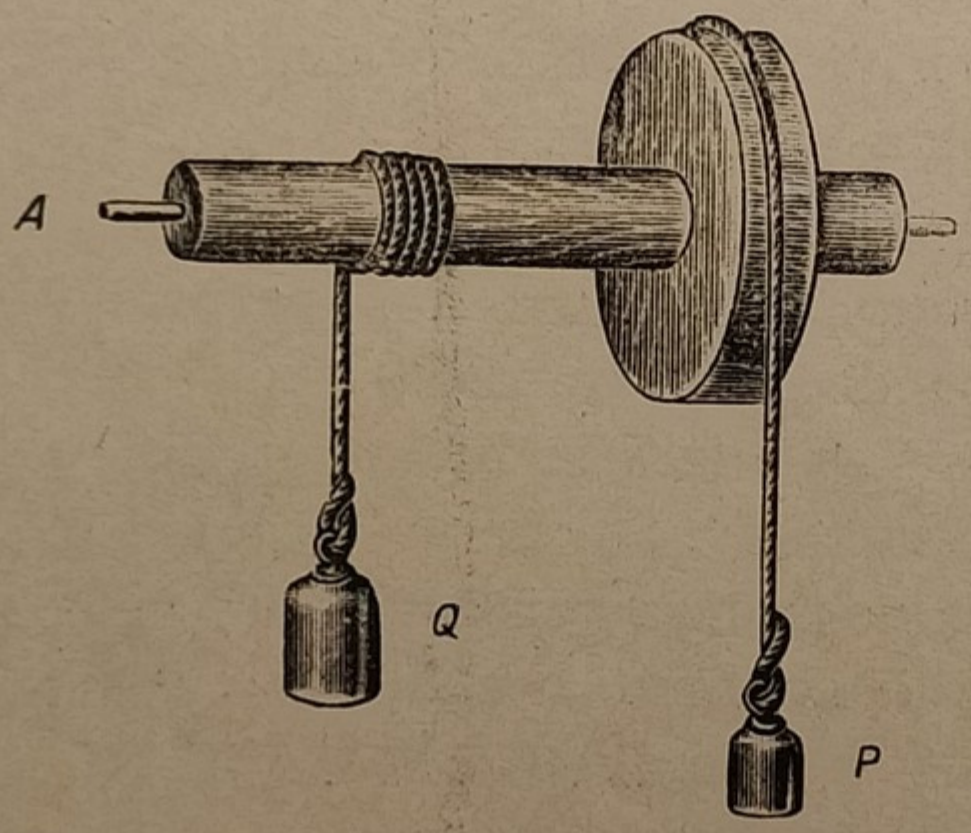

Fig. 57.

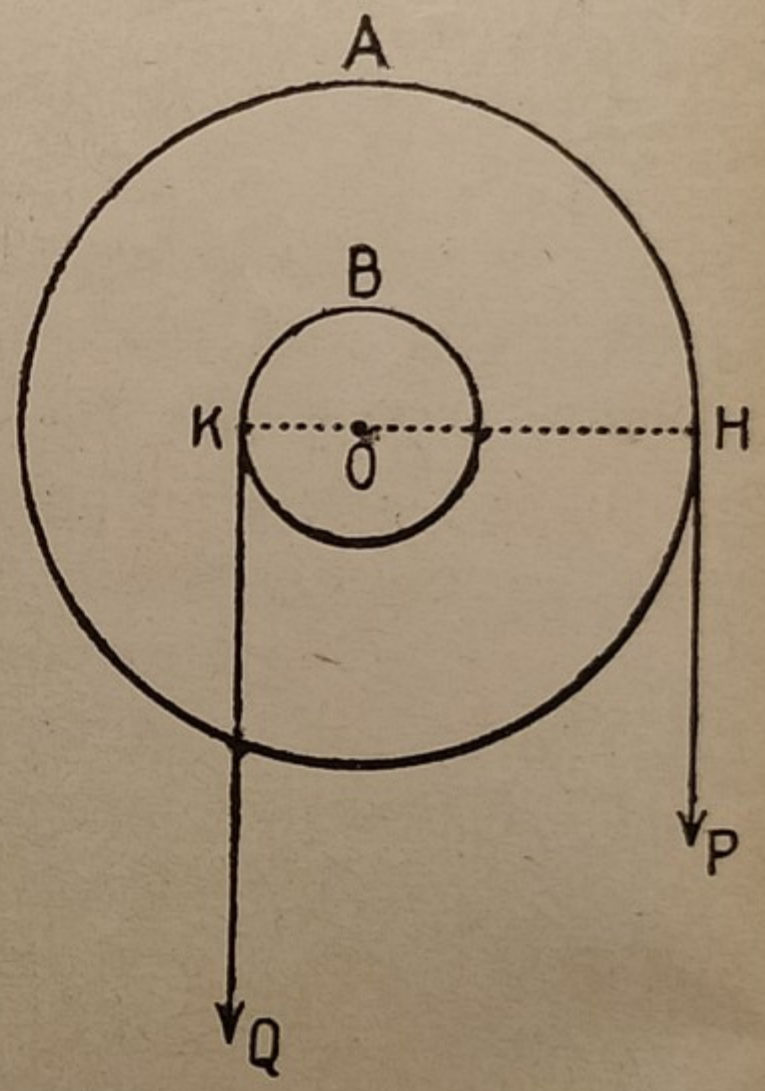

Fig. 58.

Sempre per la teoria dei corpi girevoli l'equazione di equilibrio è in valore assoluto:

$$P : Q = OK : OH ,$$

cioè *la potenza sta alla resistenza come il raggio del cilindro sta al raggio della ruota.*

In pratica, anzichè una ruota, al cilindro si applicano delle manovelle, e in tal caso la macchina, se è ad asse orizzontale, si dice *verricello* (fig. 59), se l'asse è verticale, *argano* (figura 60). In tutti i casi, la condizione di equilibrio, ammesso che la potenza agisca all'estremità di una manovella, perpendicolarmente a questa e in piano perpendicolare all'asse di rotazione, è sempre la stessa, cioè *la potenza sta alla resistenza come il raggio del cilindro sta alla lunghezza della manovella, contata tale lunghezza dall'asse al punto di applicazione della potenza.*

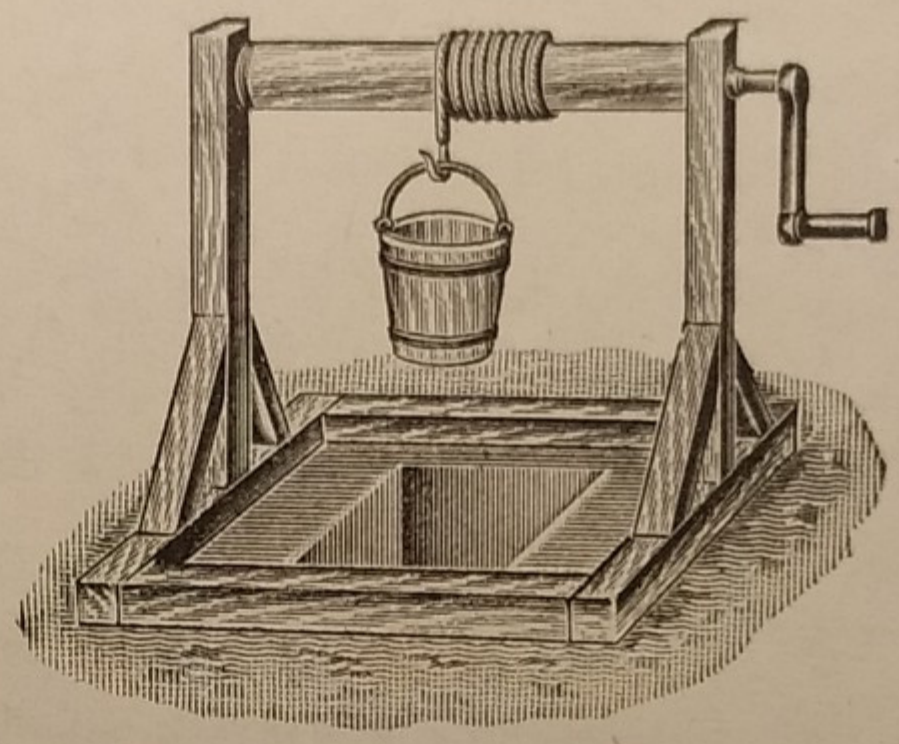

Fig. 59.

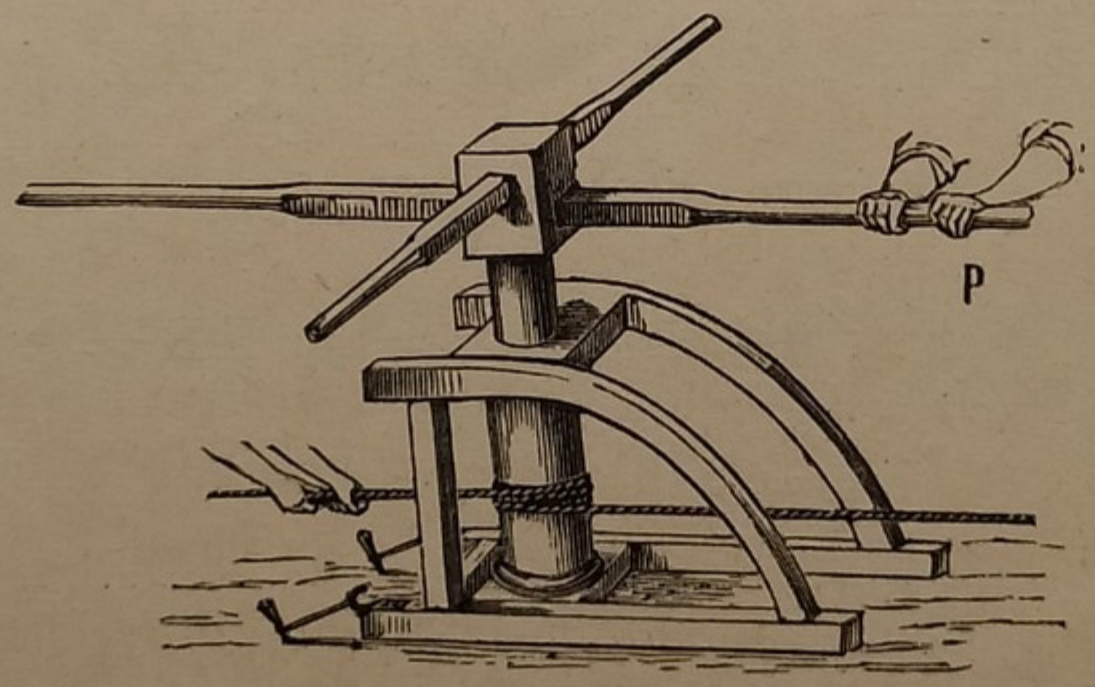

Fig. 60.

4) *Il piano inclinato* è un piano che non è nè orizzontale nè verticale, e viene rappresentato da un triangolo rettangolo *ABC* (fig. 61). L'ipotenusa *AB* rappresenta in sezione normale il piano inclinato e vien detta *lunghezza* del piano; i cateti *AC*, *CB* ne rappresentano rispettivamente l'*altezza* e la *base*. L'angolo *ABC* dicesi inclinazione del piano.

Consideriamo un corpo pesante M poggiato sul piano, che vi possa scorrere liberamente senza attrito. Il peso MR del corpo si decompone in due forze (11), la MF parallela alla lunghezza del piano e la MN perpendicolare al piano stesso. Quest'ultima è equilibrata dalla resistenza del piano, la componente utile è solo la MF; che è la forza che determina la discesa del corpo. Talchè è manifesto che per equilibrare il corpo è sufficiente equilibrare la MF, ciò che nel modo più semplice si ottiene applicando al corpo una forza MP eguale ed opposta alla MF.

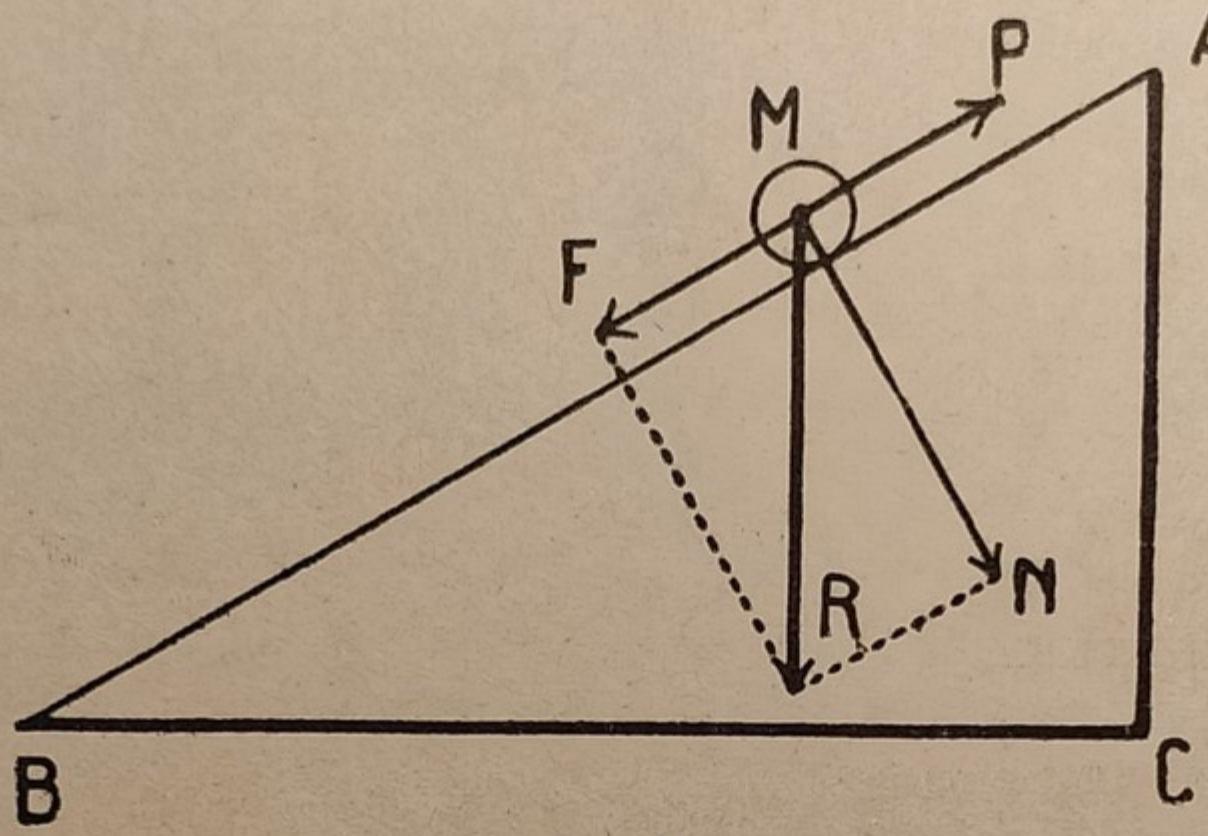

Fig. 61.

Dalla similitudine dei triangoli MFR, ACB si ricava:

$$MF : MR = AC : AB .$$

E facendo per semplicità: $AC = h$, $AB = l$:

$$P : R = h : l ,$$

o anche:

$$P = R \frac{h}{l} ,$$

sicchè *per mantenere il corpo in equilibrio sopra un piano inclinato basta applicargli una forza* — potenza — *parallela al piano che sta al peso del corpo* — resistenza — *come l'altezza sta alla lunghezza del piano.*

Ciò che precede non esclude che si possa, volendo, equilibrare il corpo che poggia sul piano anche in altre maniere, ad esempio, con una potenza P che agisce *parallelamente alla*

base del piano (fig. 62). Basta perciò decomporre il peso MR del corpo in due forze, la MF orizzontale e la MN perpendicolare al piano. Quest'ultima non ha effetto per il moto del corpo, resta attiva solo la MF, per equilibrare la quale basta applicare una forza MP eguale e contraria. Con un procedimento in tutto simile al precedente, si verrebbe in questo caso alla seguente conclusione, che, *per equilibrare un corpo con una potenza parallela alla base del piano, occorre che tal forza stia al peso del corpo come l'altezza sta alla base del piano.*

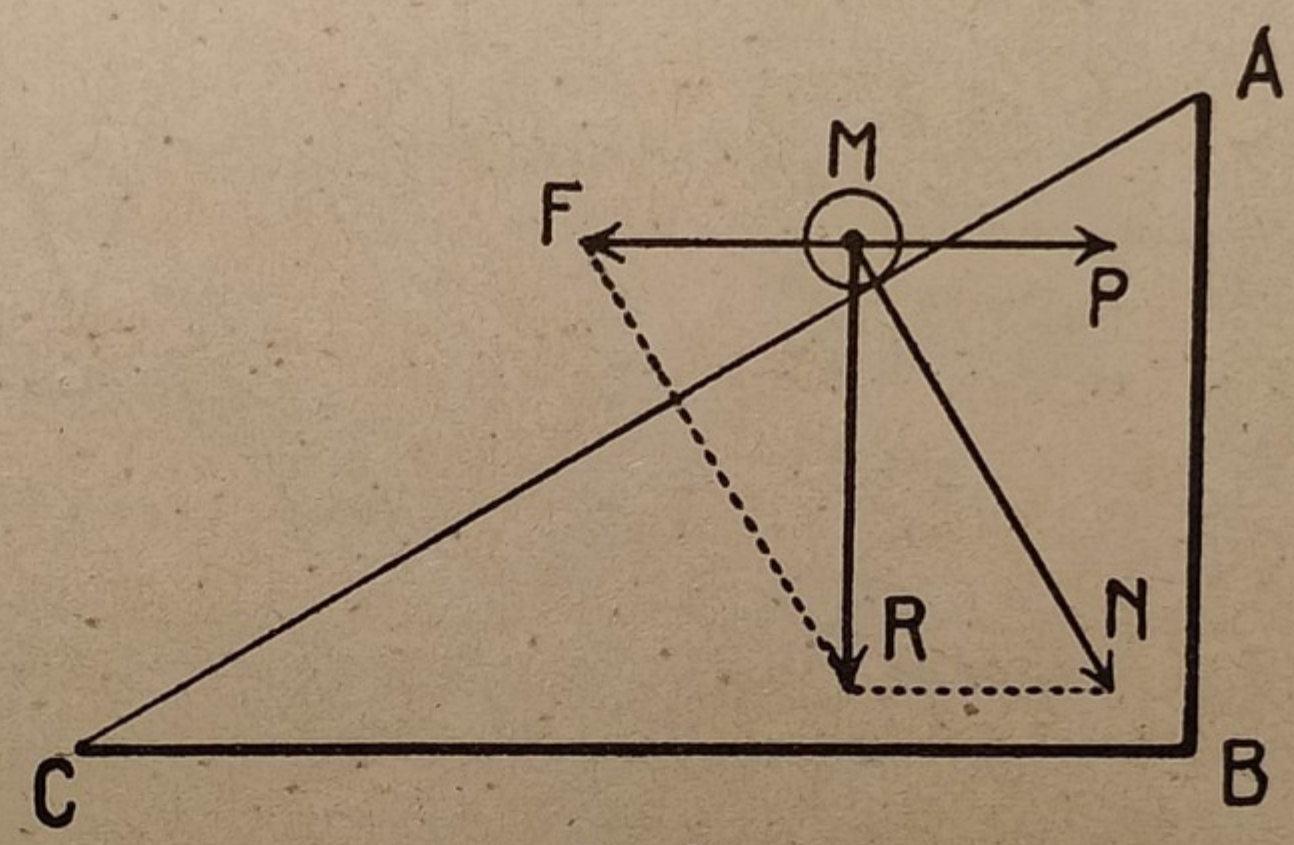

Fig. 62.

Notisi che, a parità di condizioni, la potenza in questo secondo caso deve avere un valore più grande che nel primo. Nel primo caso la potenza è sempre inferiore al peso del corpo, perchè l'altezza del piano è sempre inferiore alla lunghezza; nel secondo caso la potenza riesce inferiore al peso finchè l'altezza riesce inferiore alla base, ossia finchè l'inclinazione del piano è inferiore a 45°; nel caso contrario la potenza supera il peso del corpo.

5) *Il cuneo* è un prisma rigido, avente per base un triangolo isoscele e si adopera o per dividere un corpo in due parti o per tenere separati due corpi, introducendo lo spigolo più affilato, che si dice *tagliente*, nella fenditura o nell'intervallo fra i due corpi e applicando la potenza normalmente alla faccia opposta al tagliente; questa faccia dicesi *testa* del cuneo, e le due facce formanti il tagliente diconsi *fianchi* (fig. 63).

Però nell'esporre la condizione di equilibrio del cuneo, chiameremo testa la lunghezza AB della base del triangolo isoscele (fig. 64) e fianco la lunghezza AC dei lati eguali. Sia OP la potenza applicata perpendicolarmente ad AB nel suo punto di mezzo.

Tale forza si decompone in due R ed R_1 che agiscono perpendicolarmente ai fianchi AC e BC e che vengono equilibrate da

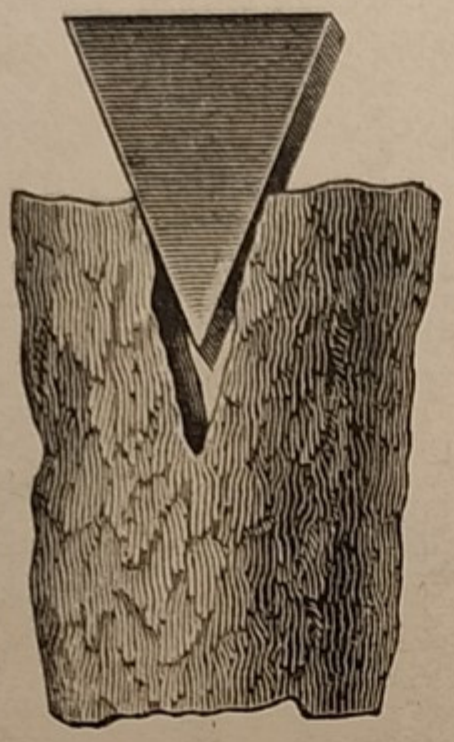

Fig. 63.

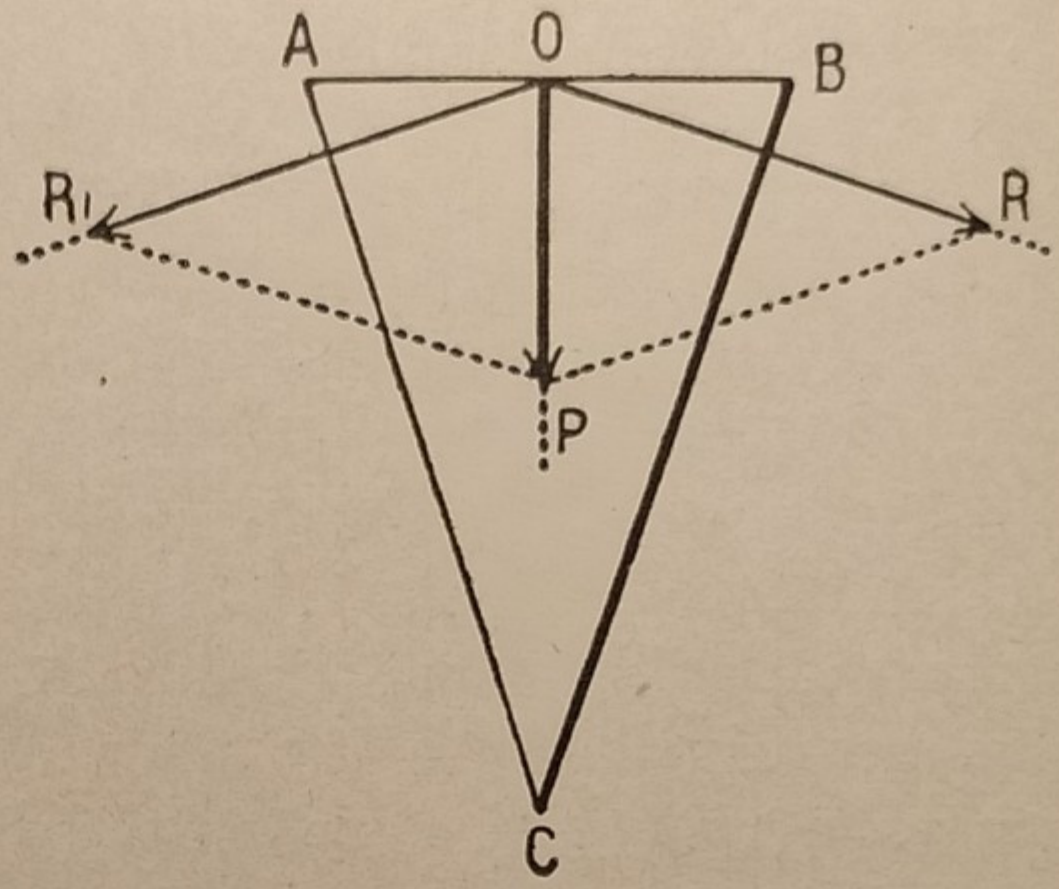

Fig. 64.

due resistenze eguali e contrarie con cui il corpo reagisce contro i fianchi del cuneo. Con facile ragionamento si riesce a dimostrare che *per l'equilibrio del cuneo la potenza sta a ciascuna delle due resistenze, come la testa sta al fianco.*

Sono cunei i coltelli, gli scalpelli, i chiodi e in genere tutti gli strumenti da punta e da taglio.

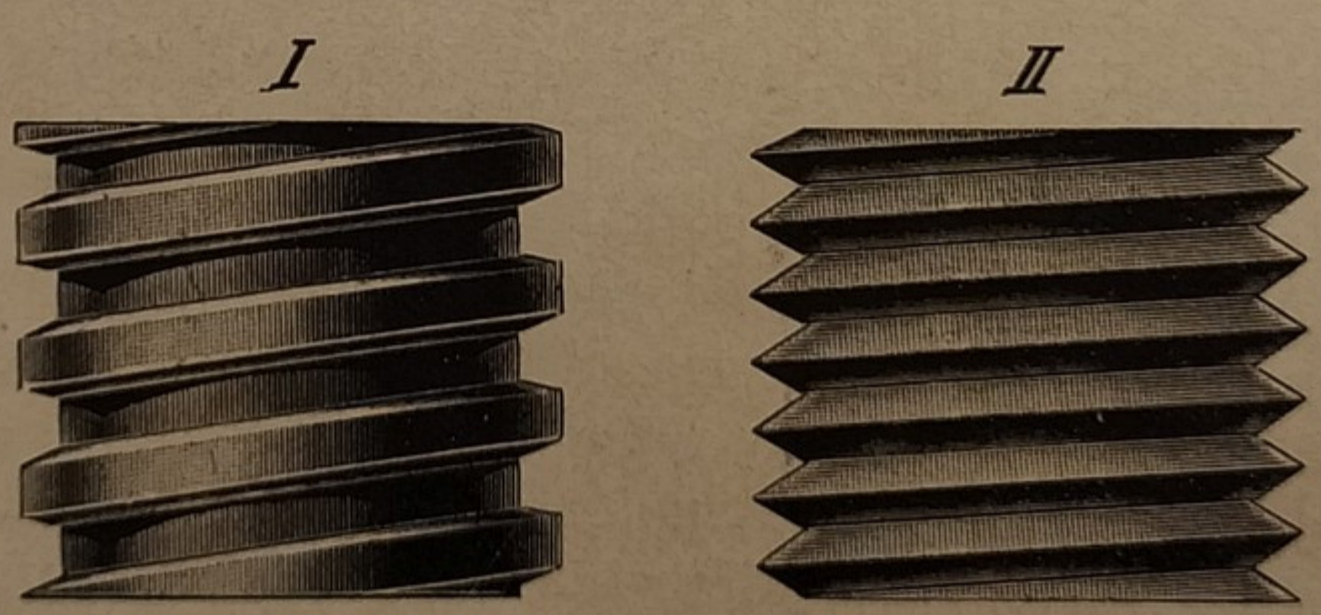

Fig. 65.

6) *La vite* è un cilindro rigido, sul quale è avvolto ad elica un rilievo, detto *filetto*, *pane* o *verme* avente sezione rettangolare o triangolare (fig. 65). In tutti i casi la vite è

sempre impegnata in un pezzo cavo detto *madrevite* (fig. 66) che porta una scanalatura elicoidale, nella quale è esattamente compreso il filetto della vite. La distanza fra due spire successive, misurata parallelamente all'asse, dicesi *passo* della vite.

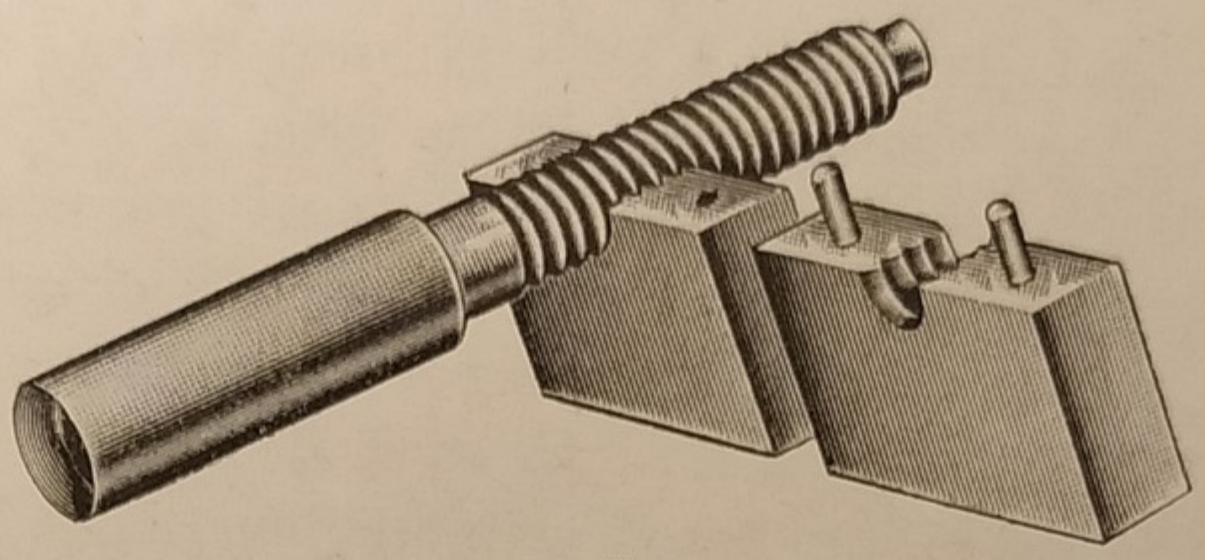

Fig. 66.

In questa macchina troviamo talora mobile la vite (fig. 67), tal altra la madrevite (figura 68). In tutti i casi, durante la rotazione del pezzo mobile, questo assume, rispetto all'altro, uno spostamento progressivo lungo l'asse, e tale spostamento per un giro completo è eguale al passo, e per una data frazione di giro equivale alla stessa frazione di passo.

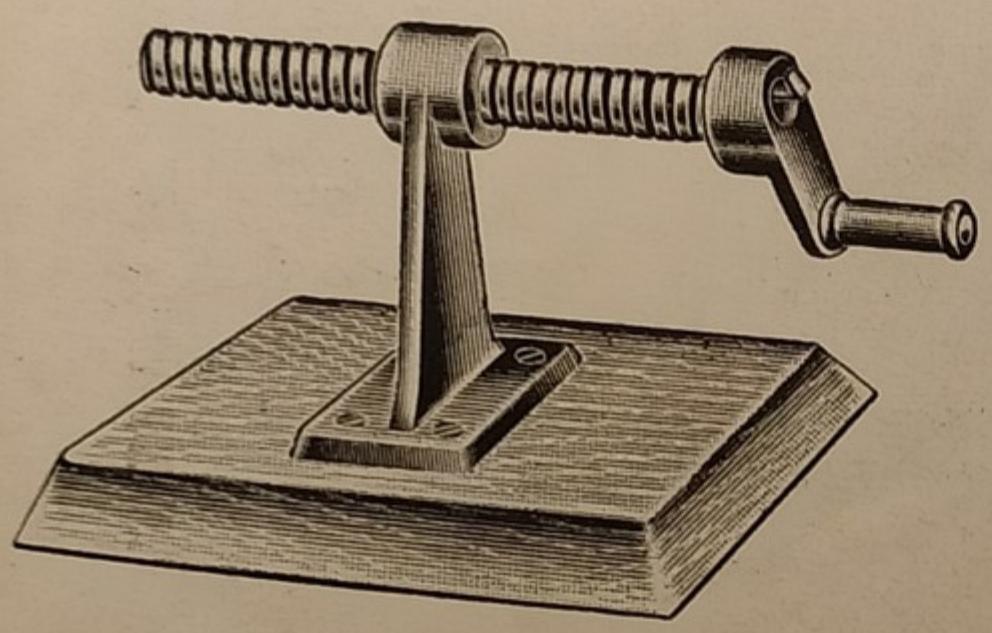

Fig. 67.

Nei torchi la vite è utilizzata per esercitare delle forti pressioni. Nel copialettere (fig. 69), che può prendersi come rappresentante di tali macchine, la potenza agisce alla estremità

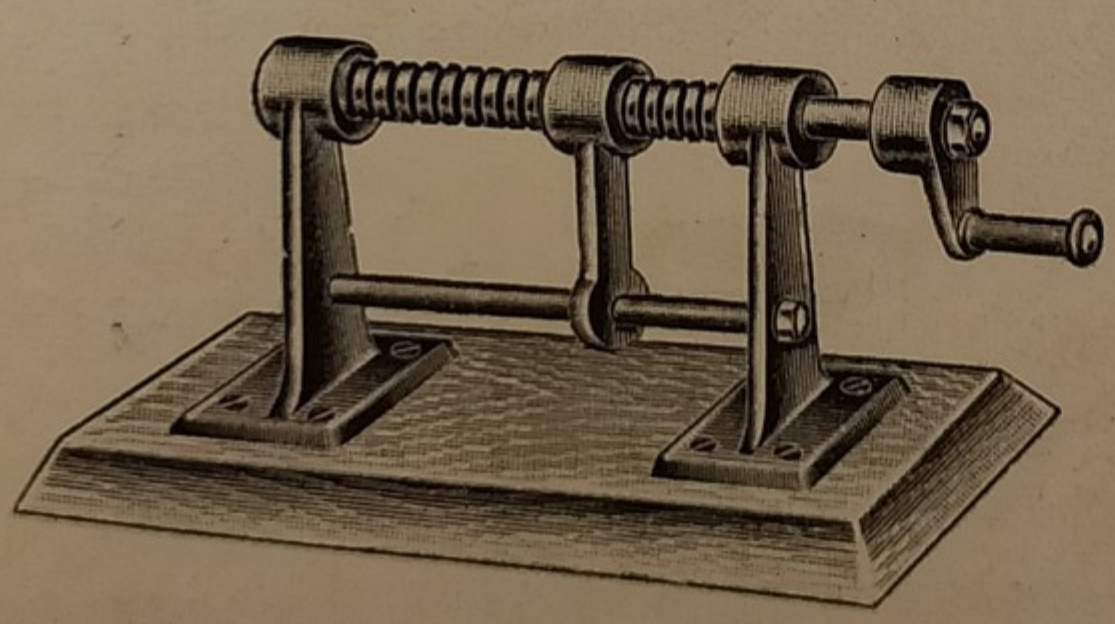

Fig. 68.

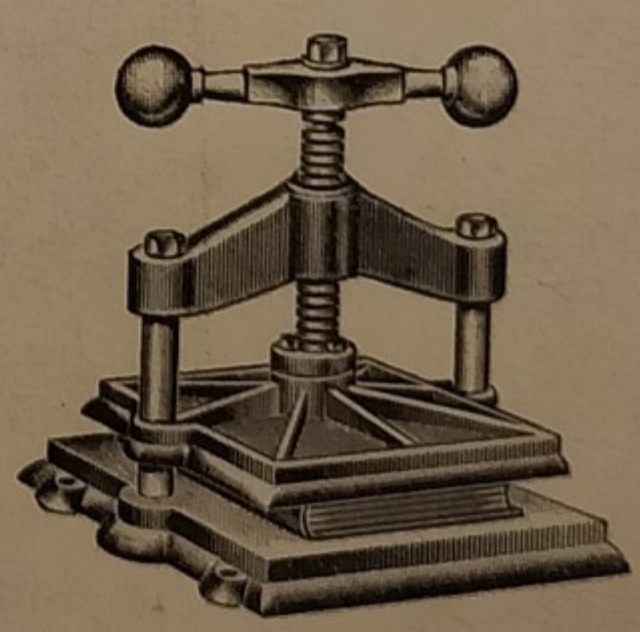

Fig. 69.

di una manovella e ammetteremo che essa agisca perpendicolarmente alla manovella e in piano perpendicolare all'asse della vite.

La resistenza è la risultante di tutte le forze che si oppongono all'avanzamento della vite, ed agisce in direzione dell'asse. Nel caso del copialettere la resistenza, prescindendo dagli attriti, è la pressione a cui è soggetto il libro-copialettere e si può dimostrare che *per l'equilibrio la potenza P sta alla resistenza R come il passo h della vite sta alla circonferenza descritta dal punto di applicazione della potenza.*

Cioè si ha che:

$$\frac{P}{R} = \frac{h}{2\pi l},$$

essendo l la distanza del punto di applicazione della potenza dall'asse della vite.

Nei comuni copialettere il passo della vite è di $0^{cm},5$ la lunghezza del manubrio, a partire dall'asse, 15^{cm}, sicchè agendo con due mani, ciascuna colla potenza di 10^{kg}, ciò che equivale ad una forza unica di 20^{kg} agente ad una sola estremità del manubrio, la resistenza R è data evidentemente dall'equazione:

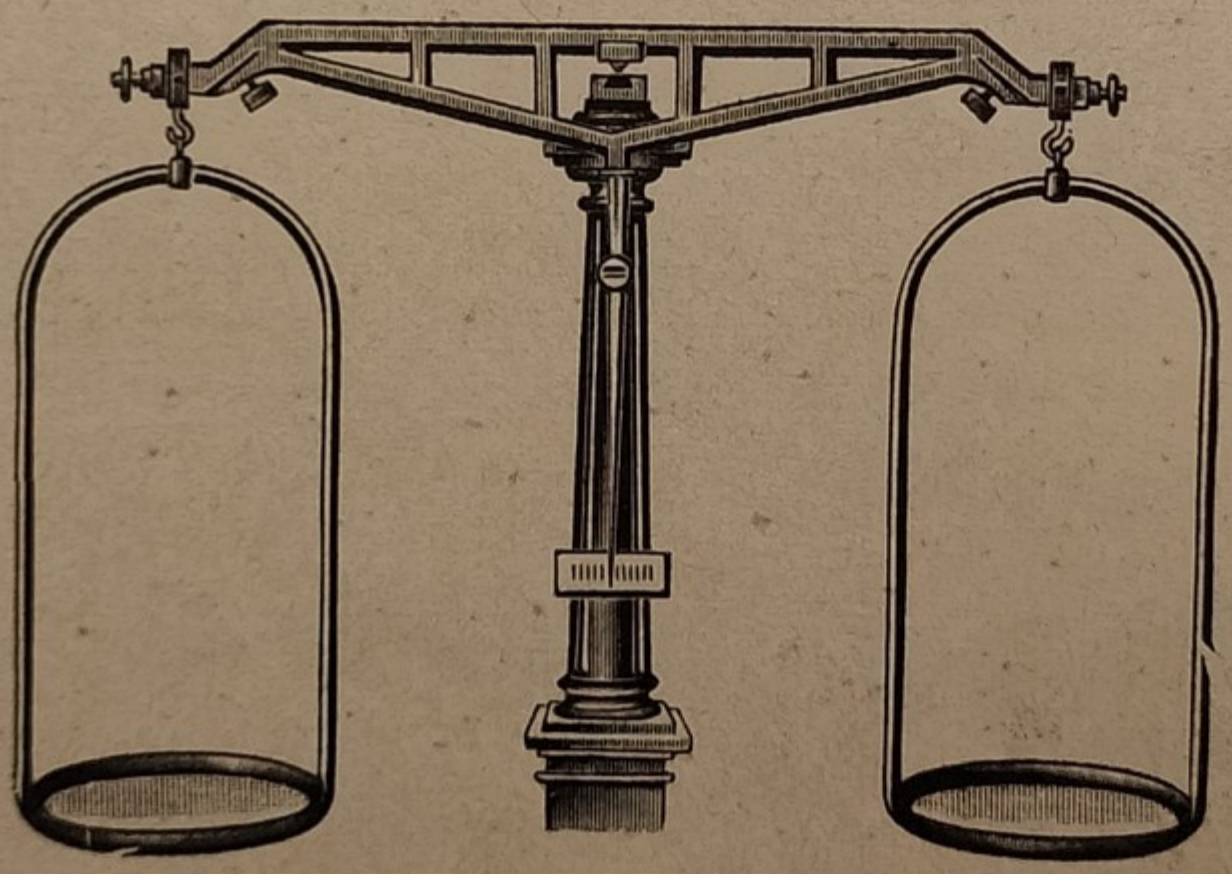

Fig. 70.

$$R = 20 \times \frac{2\pi \times 15}{0,5}$$

ossia:

$$R = 3768^{kg}.$$

17. Applicazione delle macchine semplici. — Un'importante applicazione della leva la abbiamo nella *bilancia* e nella *stadera*.

La bilancia è formata essenzialmente di una leva (fig. 70) detta *giogo*, che di solito ha la forma di un rombo allungato. Il giogo porta fissato perpendicolarmente un prisma di acciaio P

(fig. 71), il cui spigolo *O*, detto anche *coltello*, poggia sopra due piccoli piani *xy* di acciaio o di agata, situati nello stesso piano orizzontale, l'uno davanti e l'altro di dietro al giogo, e portati da una colonna verticale.

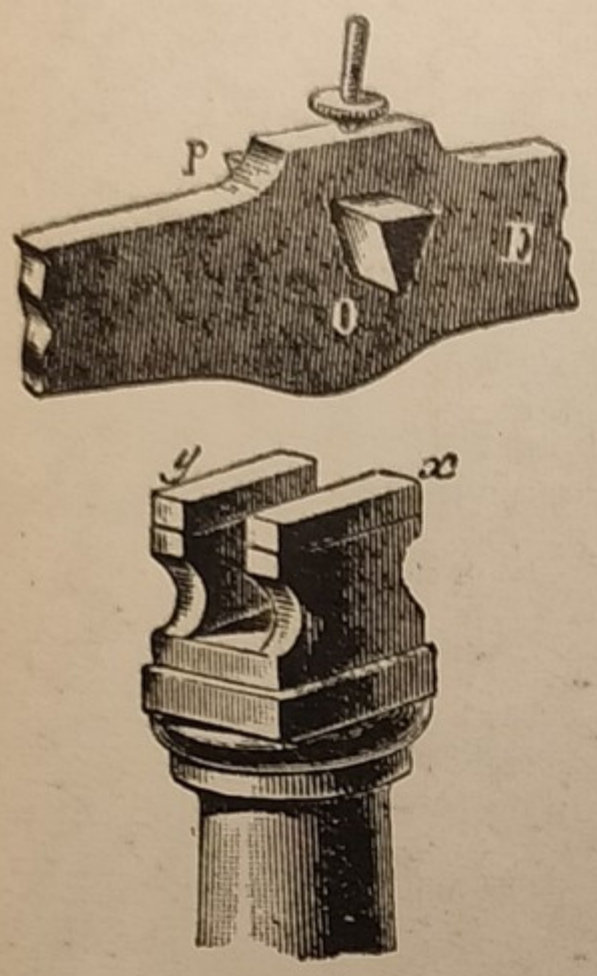

Fig. 71.

Ciascun piattello riposa mediante un uncino sopra un coltello orizzontale di acciaio *B*, fissato all'estremità del giogo (fig. 72). Gli spigoli dei prismi laterali rivolti in alto, sono paralleli allo spigolo del prisma centrale, e i tre spigoli sono sullo stesso piano. Questo sistema di sospensione presenta una grande mobilità, necessaria per avere una buona pesata. Or deve avvenire che quando i piattelli sono scarichi o carichi di pesi eguali, il giogo, dopo aver oscillato liberamente, si disponga *orizzontale* in equilibrio stabile. Essere il giogo orizzontale significa che è orizzontale il piano dei tre coltelli *a*, *o*, *b* (fig. 73). Per giudicare della orizzontalità del giogo, a questo si unisce un lungo indice *f* rivolto in basso colla punta di fronte a una graduazione *cc* fissa sulla colonna della bilancia. La bilancia essendo ben regolata il giogo è orizzontale quando l'indice è a zero, cioè corrisponde al segno mediano della graduazione.

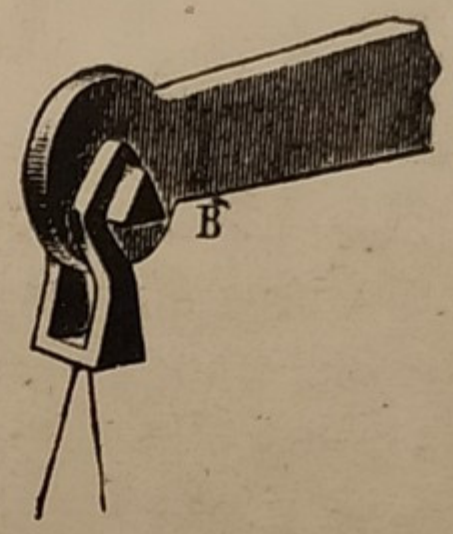

Fig. 72.

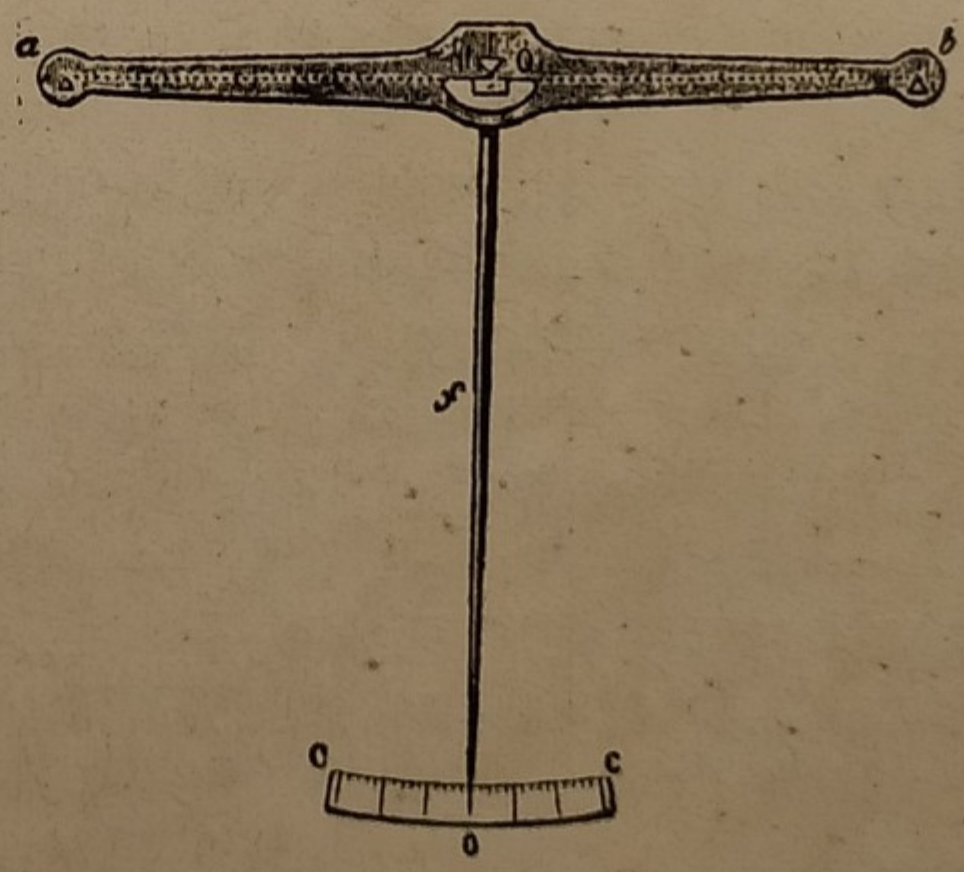

Fig. 73.

Ma occorre anzi tutto regolare la bilancia, e sopra tutto,

servendosi delle viti di livello su cui poggia la base, rendere il piano d'appoggio del coltello centrale ben orizzontale.

Una bilancia deve essere *giusta*, e lo è se, essendo i piattelli carichi di pesi eguali, il giogo libero si mette in equilibrio coll'indice sullo zero. Ciò avviene se in tale posizione il centro di gravità del giogo si troverà sotto al coltello centrale in uno stesso piano verticale coll'asse di sospensione e se i due *bracci* del giogo, cioè le distanze dei coltelli laterali da quello centrale, saranno eguali, giacchè solamente a questa condizione la somma algebrica dei momenti dei pesi eguali potrà essere nulla (12).

La bilancia deve essere inoltre *sensibile*, cioè tale che per una piccola differenza di carica dei due piattelli, l'indice si sposti d'una quantità apprezzabile. Per realizzare tale condizione si richiede che il giogo abbia i bracci lunghi, sia leggero, e che il suo centro di gravità, pur rimanendo al disotto dell'asse di rotazione, senza di che l'equilibrio non sarebbe stabile, gli sia molto vicino.

Il grado di sensibilità di una bilancia può essere misurato dal numero delle divisioni di cui si sposta l'indice per una data differenza di carico, per esempio, di 1 milligrammo. Ma si riscontra che tal grado di sensibilità diminuisce col crescere della carica totale; e la teoria dimostra che ciò dipende dall'inflettersi del giogo sotto l'azione delle cariche. Se si vuole quindi che la sensibilità rimanga indipendente dalle cariche, occorre che il giogo sia robusto, pur conservando la necessaria leggerezza. Ed è perciò che per conciliare lunghezza, leggerezza e robustezza, per quanto è possibile, il giogo è fatto di un unico pezzo, col sistema delle costruzioni a *traliccio* — ponti metallici, torri metalliche e simili — sistemi che assicurano robustezza e leggerezza ad un tempo. Oltre a ciò il metallo di cui si fabbricano i gioghi delle bilancie moderne è resistente e leggero: si usa spesso il *magnalio*, che è una lega di 90 parti di alluminio e di 10 parti di magnesio.

Si costruiscono così delle bilancie di precisione sensibili al milligrammo per una carica su ogni piatto di un chilogrammo. Le bilancie dei laboratori chimici sono di solito sensibili a un decimo di milligrammo per una carica di 200 grammi.

Siccome è impossibile costruire i bracci del giogo rigorosamente eguali, quando in una pesata si richieda una grande esattezza, sarà bene ricorrere a qualche artificio, e uno di questi assai semplice e che dà eccellenti risultati, è il *metodo della tara*.

Esso consiste nel porre sopra uno dei piatti, della tara, ad esempio, dei pallini di piombo, e nell'altro tanti pesi numerati quanti occorrono per equilibrarla. Poi su questo secondo piatto si pone il corpo, il cui peso sarà dato dai grammi e dalle frazioni di grammo che si dovranno togliere per ricondurre a zero l'indice del giogo.

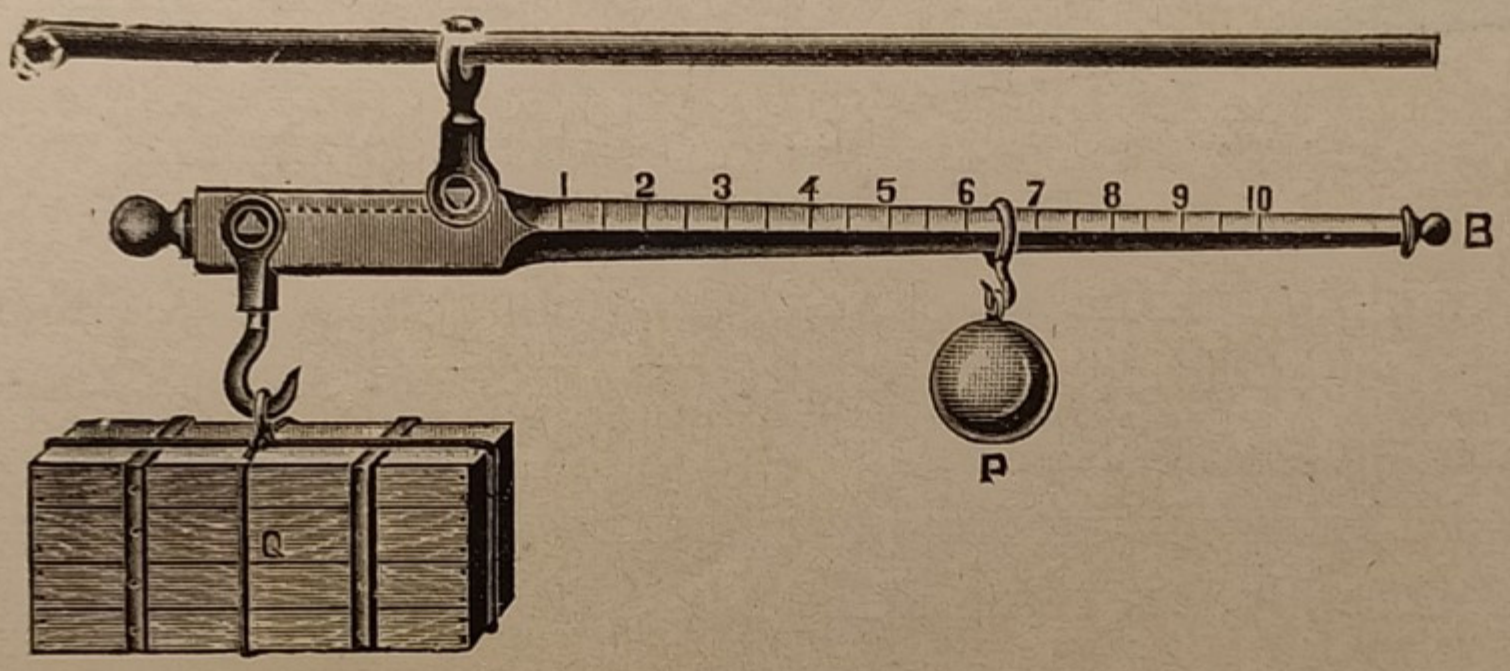

Fig. 74.

Daremo in ultimo un cenno della *stadera* (fig. 74), strumento assai comodo, ma che non consente una grande precisione. È anch'essa formata di un giogo *RB*, ma a bracci disuguali, sul tratto più lungo del quale si fa scorrere un peso costante *P*, detto *marco* o *romano*, fino a ottenere l'equilibrio del corpo, che viene sospeso ad un gancio. Il braccio più lungo della stadera porta una graduazione, ottenuta sospendendo al gancio dei corpi di noto peso. Sulla posizione che deve occupare il romano quando ha luogo l'equilibrio si legge il numero che misura il peso del corpo.

Altre applicazioni della leva troviamo in un gran numero di utensili e di comuni oggetti. Le pinze, le tenaglie comuni, le forbici sono leve doppie, ma la loro teoria si riduce a quella della leva semplice, basta supporre fissa una delle lamine. Negli strumenti indicati il braccio di leva, che sta dalla parte

della mano, è di solito più lungo dell'altro, per cui con una limitata potenza si può equilibrare una resistenza considerevole.

Perciò quando si vuol tagliare colle forbici un cartone un po' duro, lo si pone, per quanto è possibile, vicino al punto fisso, allo scopo di rendere assai più efficace lo sforzo esercitato dalla mano.

Quando adoperiamo la comune tenaglia per levare un chiodo, dapprima, tenendola normale alla tavola, si stringe fortemente il chiodo in un punto vicinissimo alla tavola; il chiodo risulta stretto fortemente per la grande lunghezza del braccio di leva che sta dalla parte della mano; in seguito, inclinando la tenaglia e facendola appoggiare sulla parte arrotondata, il punto d'appoggio è molto vicino al chiodo, il quale viene così tirato da una considerevole forza, che nei casi comuni può arrivare e superare anche 100 kg.

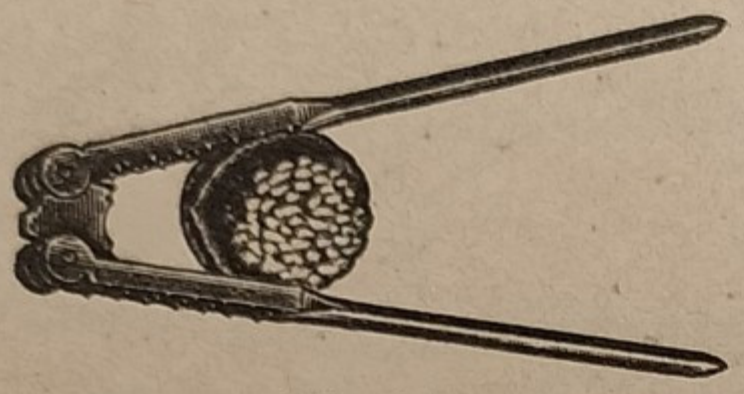

Fig. 75.

Lo *schiaccianoci* (fig. 75) è evidentemente una leva di secondo genere, come lo è il remo della barca (fig. 76).

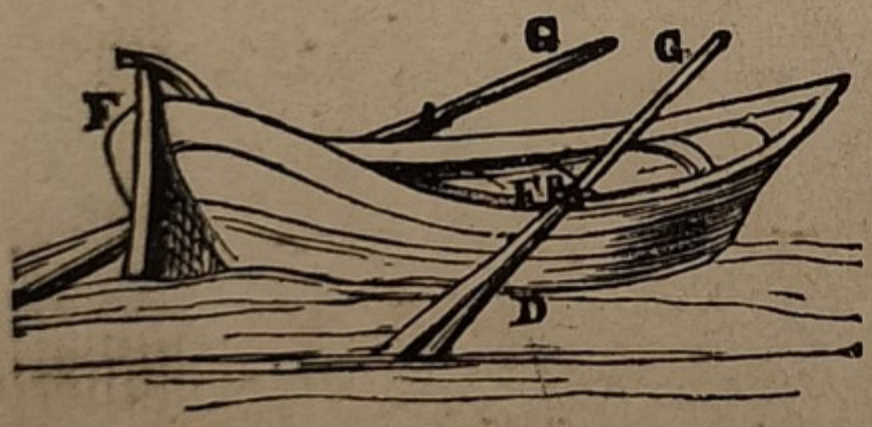

Fig. 76.

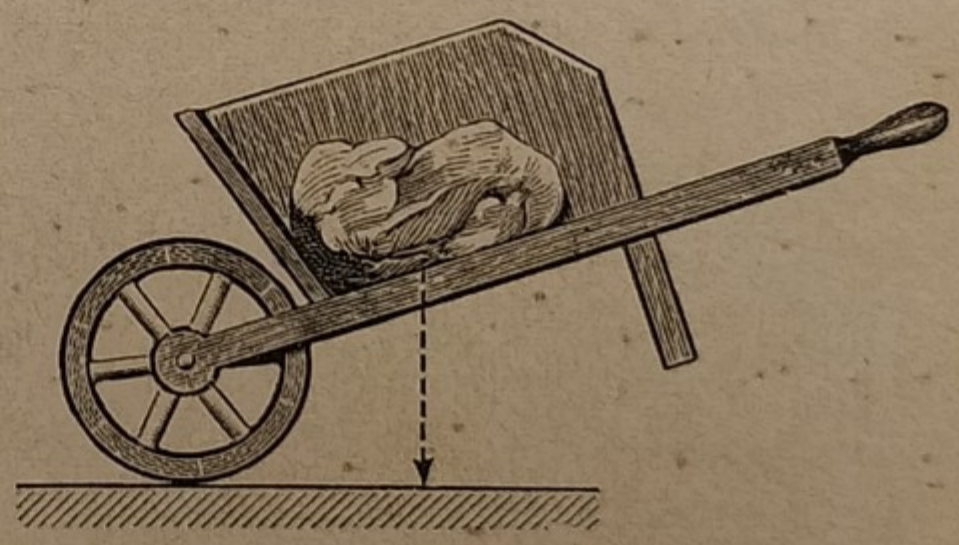

Fig. 77.

Anche nella comune carriola (fig. 77) è evidentemente realizzata una leva di secondo genere.

Qualche volta la leva è impiegata come leva di 3° genere; la potenza risulta allora superiore alla resistenza che si vuol equilibrare: ciò avviene nelle mollette dello zucchero, nel pedale di certe macchine a cucire, nelle forbici usate dal pastore per tosare le pecore. Si ricorre a tali tipi di leva quando la

resistenza da vincere sia molto piccola e interessi che il piede o la mano compiano un movimento piuttosto ristretto.

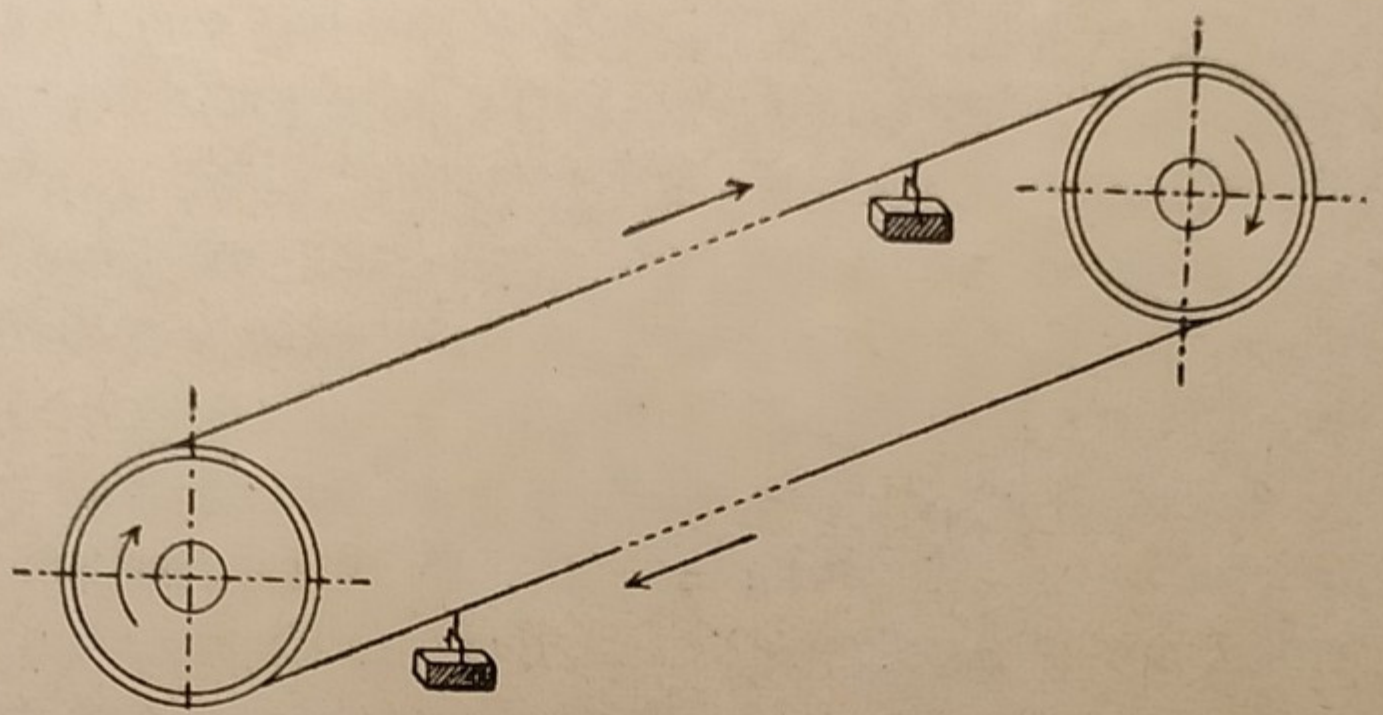

Fig. 78.

Nelle funicolari si utilizza il principio del piano inclinato, così anche nelle *teleferiche* (fig. 78) per il trasporto dei materiali nelle miniere e in montagna. Per lo stesso principio grandi carichi si possono caricare o scaricare dai veicoli facendoli scorrere su sbarre o tavole inclinate.

Fig. 79.

Le eliche sono delle vere e proprie viti, destinate a trasformare un moto rotatorio in moto rettilineo secondo una direzione perpendicolare al piano sul quale avviene il primo. In tal maniera funzionano le eliche delle navi e degli apparecchi volanti; in questi casi l'acqua o l'aria fanno l'ufficio di madrevite fissa, perciò avviene che fatta ruotare l'elica, questa e il veicolo che le è unito, assumono un moto progressivo. All'inversa agiscono i comuni *ventilatori*, nei quali la vite girante è fissa e fa da madrevite l'aria, che assume un movimento in un senso o nell'altro a seconda del senso di rotazione delle palette e della loro inclinazione.

Il funzionamento dell'elica delle navi e degli apparecchi aerei si può dimostrare con l'*elica volante* (fig. 79). Un'impugnatura

di legno *g* porta fissato in alto secondo l'asse e sporgente di parecchi centimetri un piuolo di ferro nel quale è infilato, sì da potervi girare attorno, un rocchetto di legno *w*. Questo porta fissi due piuoli di ferro laterali a quello sopra indicato. L'elica ritagliata nella forma *ab* da un pezzo di latta, porta tre fori nei quali possono comodamente passare i tre piuoli ed ha le estremità piegate in su a partire da due rette parallele inclinate sulla linea dei tre fori. Messa a posto l'elica, tenendo l'impugnatura *g* colla sinistra, si dà colla destra un forte strappo alla funicella che è avvolta sul rocchetto. L'elica assume un rapido moto rotativo e avvitandosi nell'aria sfugge dal supporto sollevandosi per parecchi metri e facendo un ampio giro nell'aria.

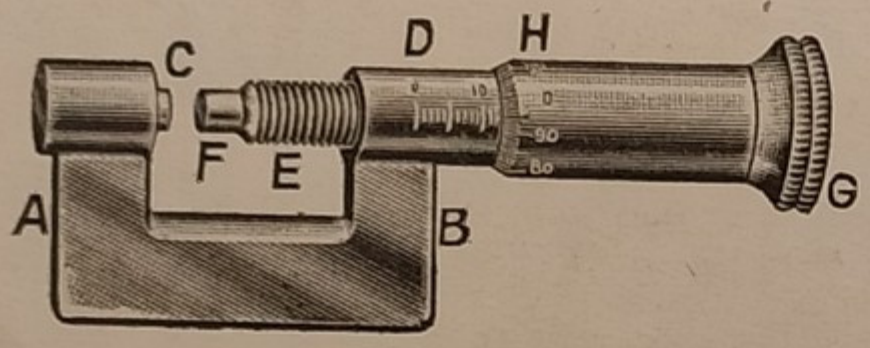

Fig. 80.

La vite è largamente usata in molti apparecchi destinati a misure di precisione, e prende allora il nome di *vite micrometrica*.

Accenniamo al *compasso di spessore*, detto comunemente *palmer*. Lo strumento serve a misurare il diametro di una sfera o di un cilindro, o lo spessore di una lamina a faccie parallele. È costituito di un robusto pezzo metallico *AB* foggiato ad **U** (fig. 80), che da una parte termina con una specie di tallone fisso *C*, e dall'altra con un cilindro *D* che fa da madrevite ad una vite *E* avente il passo di mezzo millimetro. La testa della vite porta un tamburo *H* diviso in 50 parti. Lungo una generatrice del cilindro *D* è segnata una divisione in mezzi millimetri.

L'uso dell'apparecchio si fonda sul fatto, già rilevato, che per ogni giro completo la vite si sposta di una quantità eguale al passo, e per una frazione di giro lo spostamento della vite avviene per la stessa frazione del passo. Or nell'apparecchio descritto le cose son disposte in modo che quando l'estremità *F* della vite poggia contro il tallone *C*, il bordo del tamburo diviso corrisponde alla divisione zero della madrevite, e la divisione zero del tamburo coincide colla generatrice del cilindro *D*, sulla quale è fatta la graduazione.

Se si vuol misurare lo spessore di una lamina a faccie parallele, se ne poggia una delle faccie contro il tallone C, e si porta la vite ad appoggiare col suo estremo F contro l'altra faccia. Si legge allora il numero m delle divisioni scoperte sulla graduazione della madrevite D, e la divisione n del tamburo che coincide colla retta che porta la graduazione; lo spessore cercato è evidentemente m mezzi millimetri più n cinquantesimi di mezzo millimetro, ossia $\frac{m}{2}$ millimetri più n centesimi di millimetro.

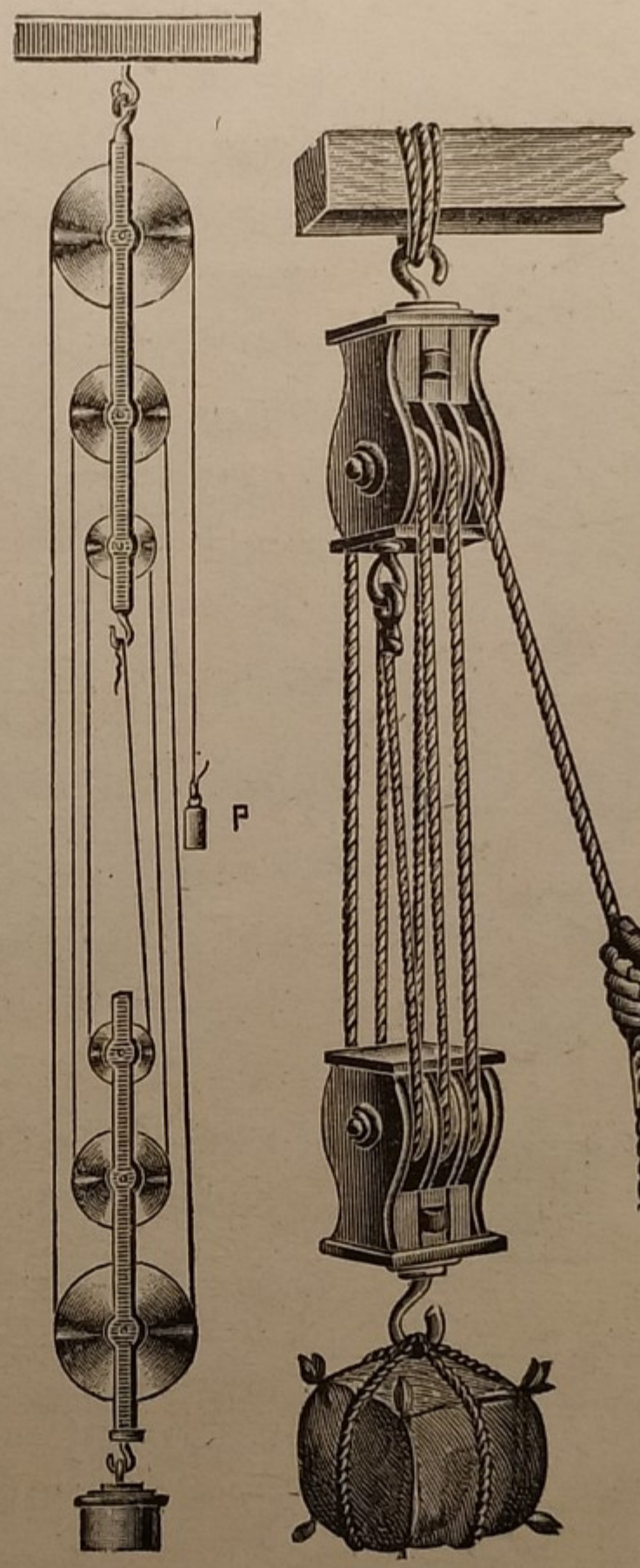

Fig. 81.

La *taglia* o *polispasto*, detta anche *paranco*, è formata di un sistema di puleggie fisse e di un sistema di altrettante puleggie mobili. Si consideri, ad esempio, un paranco a 6 puleggie (fig. 81); quando la macchina è in equilibrio i tratti di fune essendo sensibilmente paralleli fra loro, si può con forte approssimazione ammettere che ciascun tratto sopporti $\frac{1}{6} R$. Sicchè la potenza P, che deve equilibrare la carica che grava sopra un solo di tali tratti, è eguale a $\frac{1}{6} R$. In generale se N è il numero totale delle puleggie, si ha:

$$P = \frac{1}{N} R .$$

Il *paranco differenziale* è una macchina molto usata per sollevare agevolmente dei grossi carichi. Si hanno in alto (fig. 82) due puleggie solidali aventi raggi R e r poco diversi. Una fune senza capi — in pratica si usa una catena, com'è mostrato dalla figura 83, per evitare lo scorrimento — passa nelle gole delle due puleggie superiori e di una puleggia mobile inferiore che regge la resistenza Q, ch'è il carico che si vuol sollevare. Ritenendo, anche in questo caso, che la forza agente su ciascun tratto di fune uscente dalla puleggia inferiore sia $\frac{1}{2}Q$, si osserva che alla doppia puleggia superiore sono applicate tangenzialmente tre forze: P — potenza — agente con braccio $OC = R$; $\frac{1}{2}Q$ agente nello stesso senso con braccio $OB = r$, e $\frac{1}{2}Q$ agente in senso contrario con braccio $OA = R$. Quindi, per la nota teoria dei corpi girevoli, la condizione di equilibrio è la seguente:

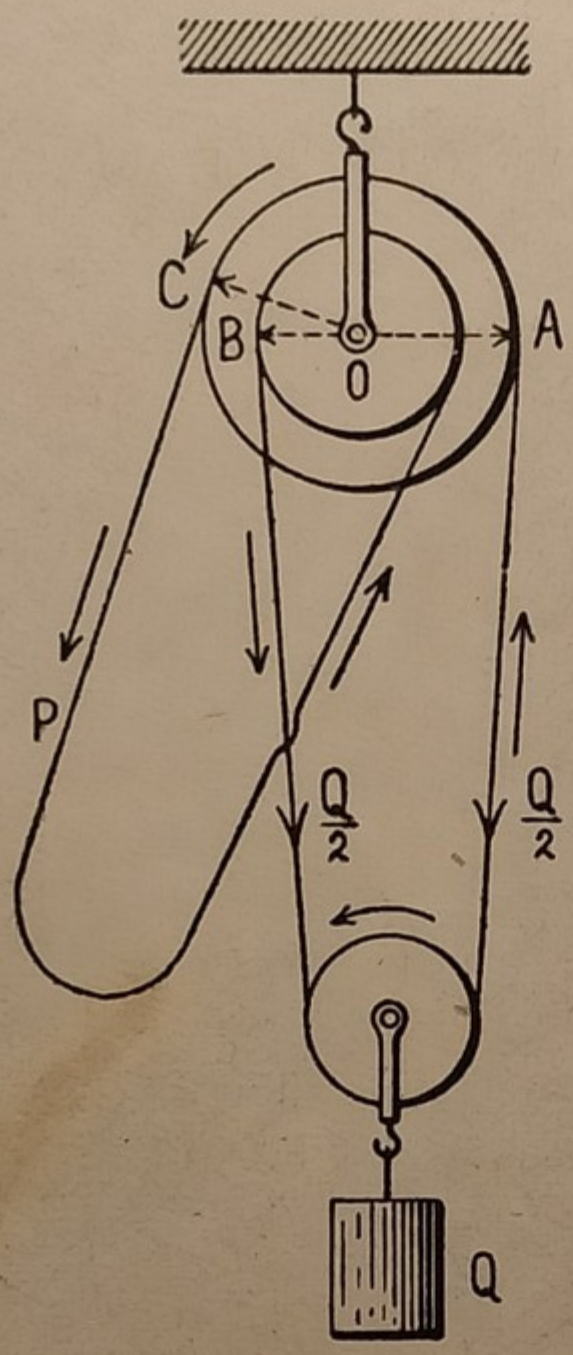

Fig. 82.

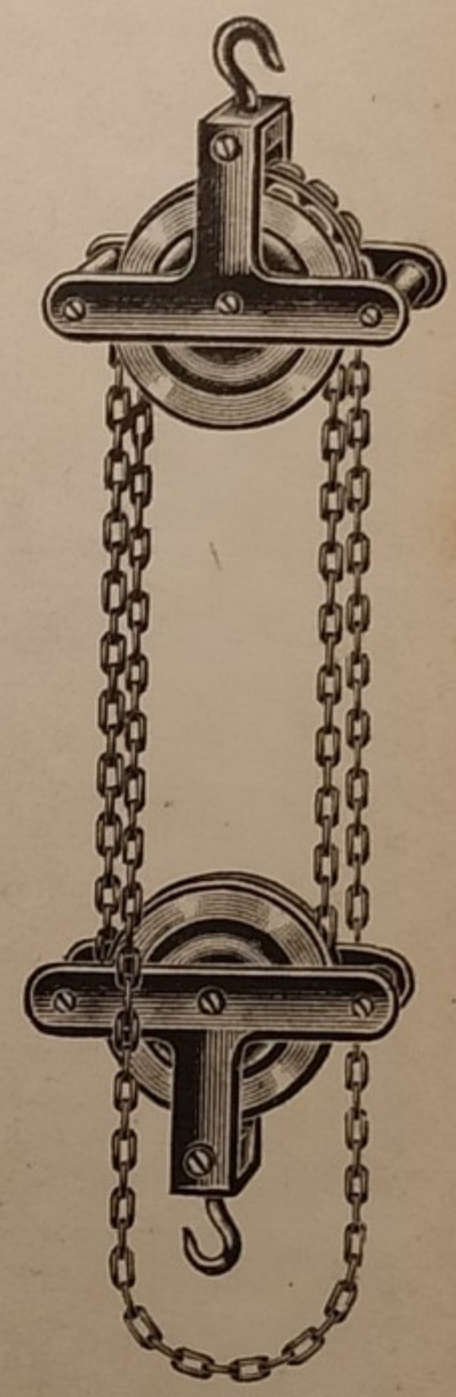

Fig. 83.

$$P \times R + \frac{1}{2}Q \times r = \frac{1}{2}Q \times R;$$

dalla quale:

$$P = Q\,\frac{R - r}{2R}.$$

Quest'equazione mostra che P può essere una frazione piccola quanto si voglia di Q, e tanto più piccola, a parità di R, quanto più piccola sia la differenza $R - r$.

Pongasi $R = 12^{cm}$, $r = 11^{cm}$, $P = 10$ kg. Si ha:

$$Q = 10 \times \frac{2 \times 12}{12 - 11} = 240 \text{ kg.}$$

Nell'*asse differenziale* (fig. 84) si hanno due cilindri coassiali rigidamente uniti. Su tali cilindri si trovano avvolti in senso contrario i due tratti di una stessa fune che passa per la gola di una puleggia mobile sulla quale agisce la resistenza. La potenza agisce all'estremità di una o due manovelle fissate al doppio cilindro.

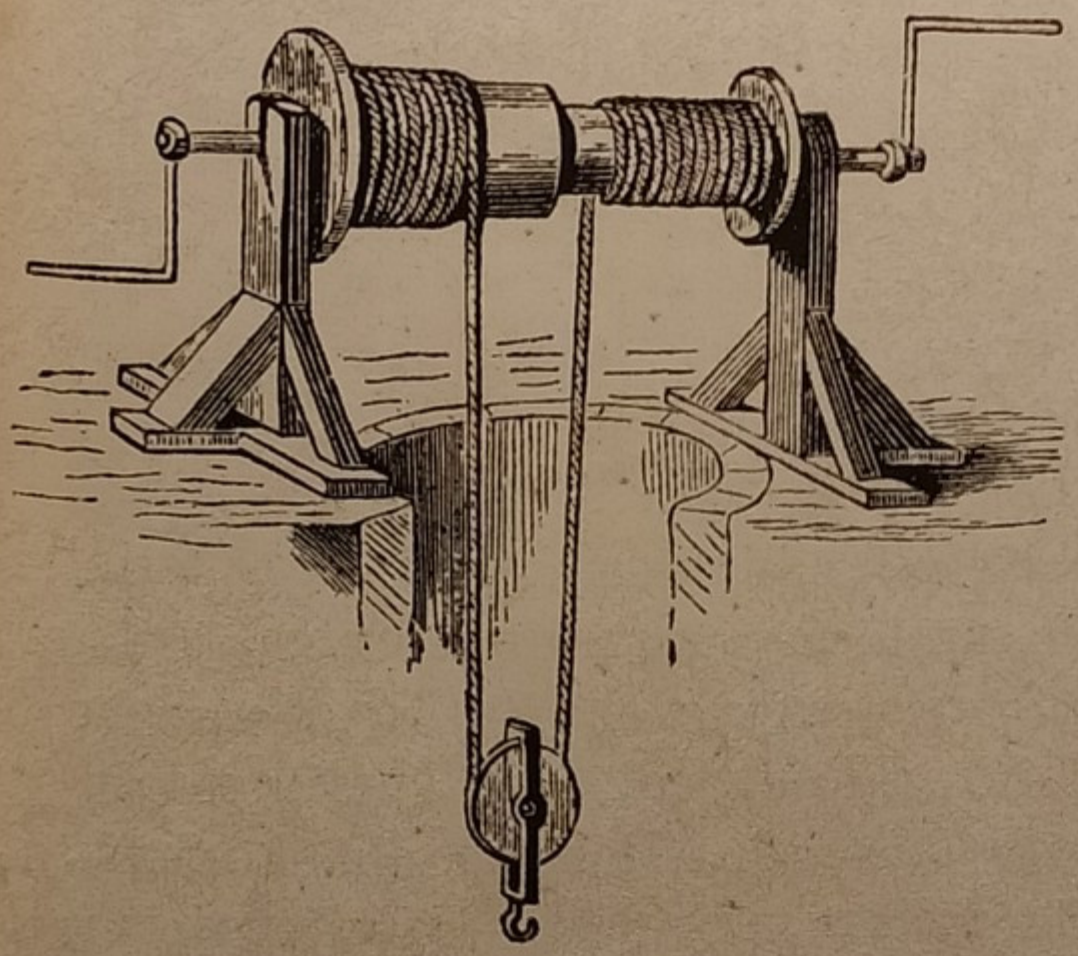

Fig. 84.

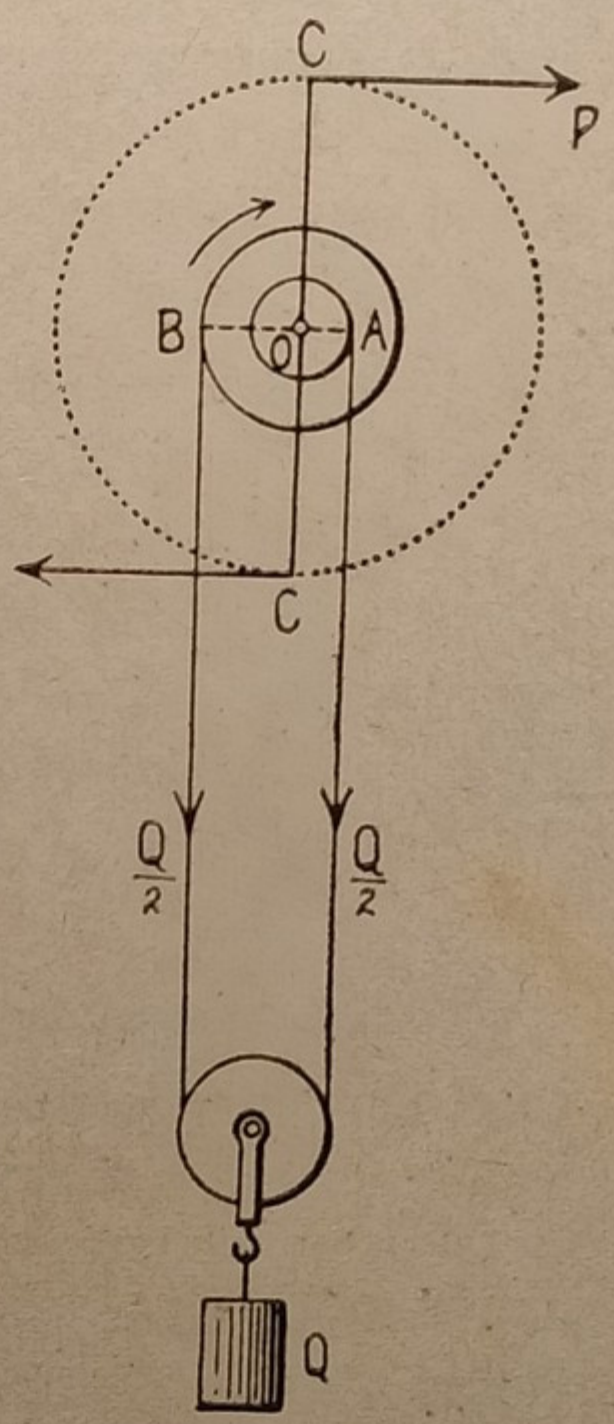

Fig. 85.

Rappresentiamo la macchina in piano perpendicolare all'asse di rotazione (fig. 85) e indichiamo rispettivamente con l, r, R la lunghezza della manovella, il raggio del cilindro minore e quello del cilindro maggiore. La teoria è identica a quella del paranco differenziale; perciò indicando con P la potenza, con Q la resistenza, si ha:

$$P = Q \frac{R - r}{2l}.$$

Dinamica.

18. Inerzia - Proporzionalità fra forza ed accelerazione - Massa - Unità dinamica di forza - Azione e reazione. — Come si sa, la *dinamica* studia le relazioni che esistono fra le forze e il moto. Essa si fonda sulle seguenti leggi, la prima dovuta in sostanza a *Leonardo da Vinci*, la seconda a *Galileo*, la terza a *Newton*.

1ª *Un corpo persevera nello stato di quiete o di moto rettilineo e uniforme finchè non interviene una forza a cambiare il suo stato.*

2ª *Una forza applicata a un corpo gli comunica un'accelerazione che ha la direzione ed il senso della forza ed è proporzionale alla intensità della forza stessa.*

3ª *Ad ogni azione corrisponde una reazione eguale e contraria.*

Le tre leggi sono dei *postulati*, ossia verità di indole sperimentale; esse si possono solo verificare, non dimostrare, e il loro valore consiste sopra tutto in questo che le *deduzioni* che se ne possono trarre, sono in armonia coi fatti sperimentali.

La 1ª legge, detta *legge d'inerzia*, dichiara che i corpi son dotati di *inerzia*, cioè che i corpi non dotati di vita, non possono mettersi in moto senza una causa esteriore, e ciò combina con tutti i fatti ai quali tutti i giorni assistiamo. Ma il principio afferma anche che un corpo quando è in moto, tende a rimanervi, ciò che può sembrarci inaccettabile dal momento che siamo abituati a vedere che i corpi ricevuto un impulso si muovono più o meno, ma finiscono col fermarsi. Non è però che ciò avvenga per una tendenza dei corpi a rimanere in riposo, ma per gli inevitabili ostacoli che si oppongono sempre al loro moto, quali l'attrito o la resistenza offerta dal fluido, più spesso dall'aria, in cui essi si muovono. Diminuendo tali ostacoli il corpo si muove più a lungo e se si riuscisse ad eliminarli completamente, rimarrebbe perennemente in moto con velocità

costante e il moto si conserverebbe anche rettilineo se nessuna causa esterna intervenisse a mutarne la direzione.

Sono dovuti alla tendenza a persistere nel movimento gli effetti che si producono quando una vettura o un convoglio qualunque vengono bruscamente a fermarsi; i viaggiatori sono, per così dire, proiettati nel senso del movimento, in causa della velocità che possiedono all'atto della fermata. S'immagini che se un freno abbastanza potente riuscisse a fermare istantaneamente un convoglio, gli effetti prodotti sarebbero identici a quelli derivanti dall'urto con un altro convoglio dello stesso peso e della stessa velocità.

E quindi anche all'inerzia si devono attribuire le cadute, spesso seguite da gravi accidenti, di coloro che scendono senza precauzione da una vettura in moto. Infatti tutti i punti del corpo essendo in moto, e i piedi soltanto venendo a fermarsi per il contatto col suolo, le parti superiori del corpo continuano nel loro moto e vengono così lanciate contro il suolo con impeto più o meno grande.

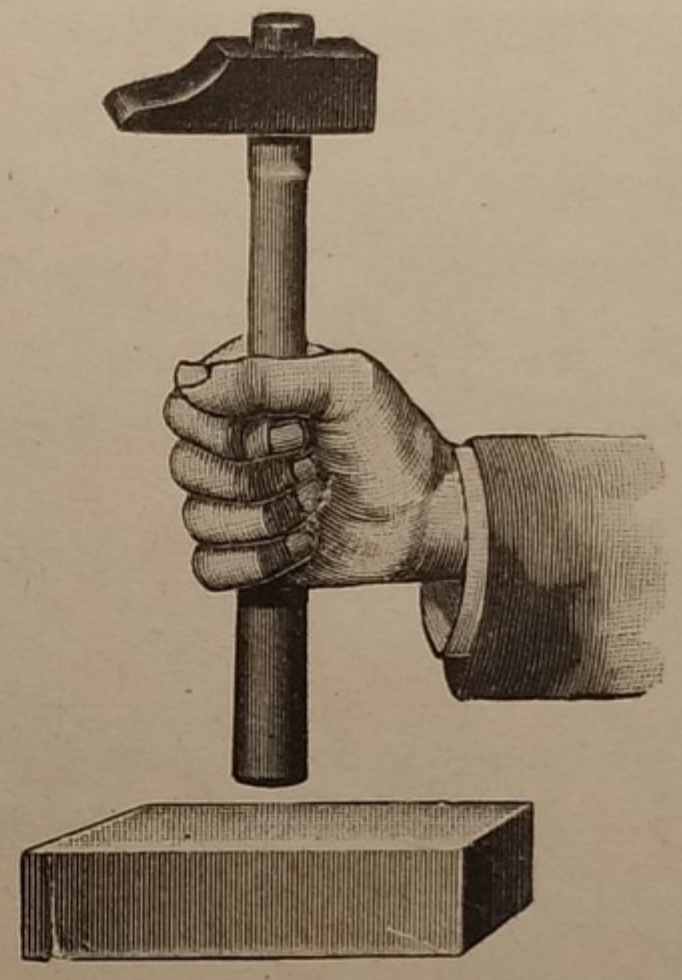

Fig. 86.

Quando per fissare a un martello il manico si batte l'estremità di questo contro un ostacolo, si utilizza l'inerzia (fig. 86).

La Terra e i pianeti si muovono intorno al Sole perchè sono animati da una velocità, che conservano, si può dire, inalterata mancando affatto qualsiasi ostacolo. È ancora per inerzia che un proiettile lanciato dall'arma compie la sua traiettoria.

La 2ª legge è stata in sostanza enunciata da Galileo in seguito a uno studio accurato sulla discesa di corpi pesanti lungo un piano inclinato. Questa legge nella sua parte numerica afferma che se sopra uno *stesso* corpo si fanno agire forze costanti — costanti in intensità e direzione — le cui intensità sieno $F_1\ F_2\ F_3 \ldots$, queste producono accelerazioni $a_1\ a_2\ a_3 \ldots$ tali che:

$$F_1 : F_2 : F_3 : \ldots = a_1 : a_2 : a_3 : \ldots$$

ossia:

$$\frac{F_1}{a_1} = \frac{F_2}{a_2} = \frac{F_3}{a_3} = \dots ;$$

cioè tra le intensità delle forze che agiscono su di un corpo e le rispettive accelerazioni esiste tal legame che il rapporto $F : a$ rimane costante. Tale rapporto costante, che quindi innanzi indicheremo con m, si è convenuto di chiamarlo *massa meccanica*, o semplicemente *massa* del corpo; per cui, per convenzione, l'eguaglianza che definisce la massa d'un corpo, è:

$$\frac{F}{a} = m . \qquad (1)$$

Or se sopra un altro corpo si vuol avere la stessa accelerazione, occorrerà applicarvi una forza F', tale che sia:

$$\frac{F'}{a} = m' \qquad (2)$$

m' essendo la massa del secondo corpo.

Poichè dividendo membro a membro le eguaglianze (1) e (2) si ha:

$$F : F' = m : m' \qquad (3)$$

possiamo concludere che i numeri m ed m' che misurano la massa dei corpi possono anche misurare l'*inerzia* dei corpi. Infatti noi possiamo ritenere che due corpi abbiano la stessa inerzia se occorrono due forze eguali per imprimere loro la stessa accelerazione, e che di due corpi abbia inerzia doppia, tripla... quello che per acquistare la stessa accelerazione richiede una forza doppia, tripla... dell'altro.

Notiamo inoltre che dalla (1) si ottiene:

$$F = am ; \qquad (4)$$

eguaglianza che ci dice che il valore della forza è espresso dal prodotto del valore dell'accelerazione per quello della massa.

Per la misura della massa di un corpo i Fisici hanno, per *convenzione*, adottato come unità il *grammo-massa*, che è *la*

millesima parte della massa del chilogrammo campione di Parigi, ossia, salvo una piccolissima differenza (9), la *massa* di un centimetro cubo d'acqua distillata a 4° C.

Una forza che agisce su tutti i corpi è la gravità terrestre, e il *peso* di un corpo è la forza che ne determina la caduta. Per eliminare tuttavia altre cause che possono modificarne la caduta, ammetteremo che essa avvenga nel vuoto. Nell'aria, la caduta dei corpi diversi si effettua differentemente: una piuma, ad es., e una moneta cadono dalla stessa altezza in tempi diversi, ma *nel vuoto tutti i corpi impiegano lo stesso tempo a cadere dalla stessa altezza*, come si vedrà più innanzi.

Stabilito ciò, possiamo dire che i corpi nello stesso luogo acquistano la stessa accelerazione, che indicheremo con g, e che chiameremo *accelerazione della gravità*. Per conseguenza se due corpi A, A' hanno masse m, m' e pesi p, p' in un luogo dove l'accelerazione è g, si ha per la (4),

$$p = mg\,; \qquad p' = m'g\,, \tag{5}$$

le quali divise membro a membro dànno:

$$\frac{p}{p'} = \frac{m}{m'}$$

cioè: *in uno stesso luogo le masse di due corpi sono proporzionali ai pesi corrispondenti*. Da ciò risulta che il confronto fra le masse di due corpi è condotto al confronto dei pesi che i corpi hanno nello stesso luogo. Sicchè se in un caso particolare fosse $p = p'$, sarebbe anche $m = m'$.

Ora avendo una bilancia accompagnata da una *pesiera*, che è una scatola contenente i pesi campioni, cioè dei blocchi metallici le cui *masse* stanno fra loro secondo rapporti numerici noti, si può formare un insieme di masse che posto su uno dei piatti *pesi* quanto il corpo di cui si vuol conoscere la massa. Per conseguenza il numero che misura la massa dei pesi campioni misura anche la massa del corpo.

E non sarà inutile avvertire a questo punto che la bilancia può solo indicarci l'eguaglianza di due pesi e quindi di due masse; essa ci può dare il valore della massa di un corpo, ma

non ci dà direttamente il valore del peso. Se si vuol questo, occorre, dopo avuta la massa del corpo, moltiplicare la massa per l'accelerazione g della gravità nel luogo dove si fa la pesata.

Torniamo ora alla formola (4); essa ci dice che F è eguale ad *uno*, se a è *uno* ed m è *uno*; considerazione questa che ha permesso di scegliere una *unità di forza*, che è stata detta *unità dinamica di forza*. Essa *è quella forza che agendo sopra il grammo-massa gli comunica l'accelerazione di 1 cm. al secondo*, ed ha il nome di *dina*. Dimodochè, se vogliamo misurare una forza, la faremo agire sopra un corpo di *nota* massa, e misureremo l'accelerazione prodotta; il numero che si ottiene facendo il prodotto del valore della massa, in grammi-massa, per quello dell'accelerazione, in centimetri al secondo, darà il valore della forza in *dine*. Questa misura delle forze è detta *misura dinamica*, misura cioè desunta dall'*effetto dinamico* d'una forza, per distinguerla dalla *misura statica*, che si eseguisce col dinamometro e nella quale il valore di una forza è ottenuto con un criterio d'equilibrio.

Del resto anche la forza che abbiamo chiamata grammo-peso (9) si può considerare sotto l'aspetto dinamico; infatti essa è la forza che determina la caduta di 1 grammo-massa. Però l'accelerazione che la forza di gravità produce è qualche poco diversa nei diversi luoghi della superficie terrestre (24). Alla latitudine di 45° è circa $980^{cm},5$, di modo che a tale latitudine:

$$1 \text{ grammo-peso} = 980{,}5 \text{ dine}$$

e

$$1 \text{ chilogrammo-peso} = 980\,500 \text{ dine.}$$

19. Impulso e quantità di moto. — Facciamo agire sopra un corpo di massa m per un tempo t una forza F. Essa comunica al corpo un'accelerazione a tale che è soddisfatta la nota relazione:

$$F = am\ ;$$

e la velocità v che il corpo per conseguenza acquista dalla forza nel tempo t è:

$$v = at\ .$$

Da queste due eguaglianze otteniamo:

$$Fat = amv \ ;$$

ossia:

$$Ft = mv \ .$$

È chiamato *impulso* di una forza F il prodotto Ft della forza per il tempo durante il quale agisce, e *quantità di moto* di un corpo il prodotto mv della sua massa per la velocità.

L'ultima relazione trovata ci dice: *la quantità di moto che una forza comunica ad un corpo è eguale all'impulso della forza*, di guisa che una stessa forza che agisce per lo stesso tempo su corpi diversi, comunica a tutti la stessa quantità di moto.

20. Azione e reazione. — La 3ª legge enunciata al principio del § 18, detta *legge dell'azione e della reazione*, ha come le altre la sua facile illustrazione. Citiamo alcuni fatti.

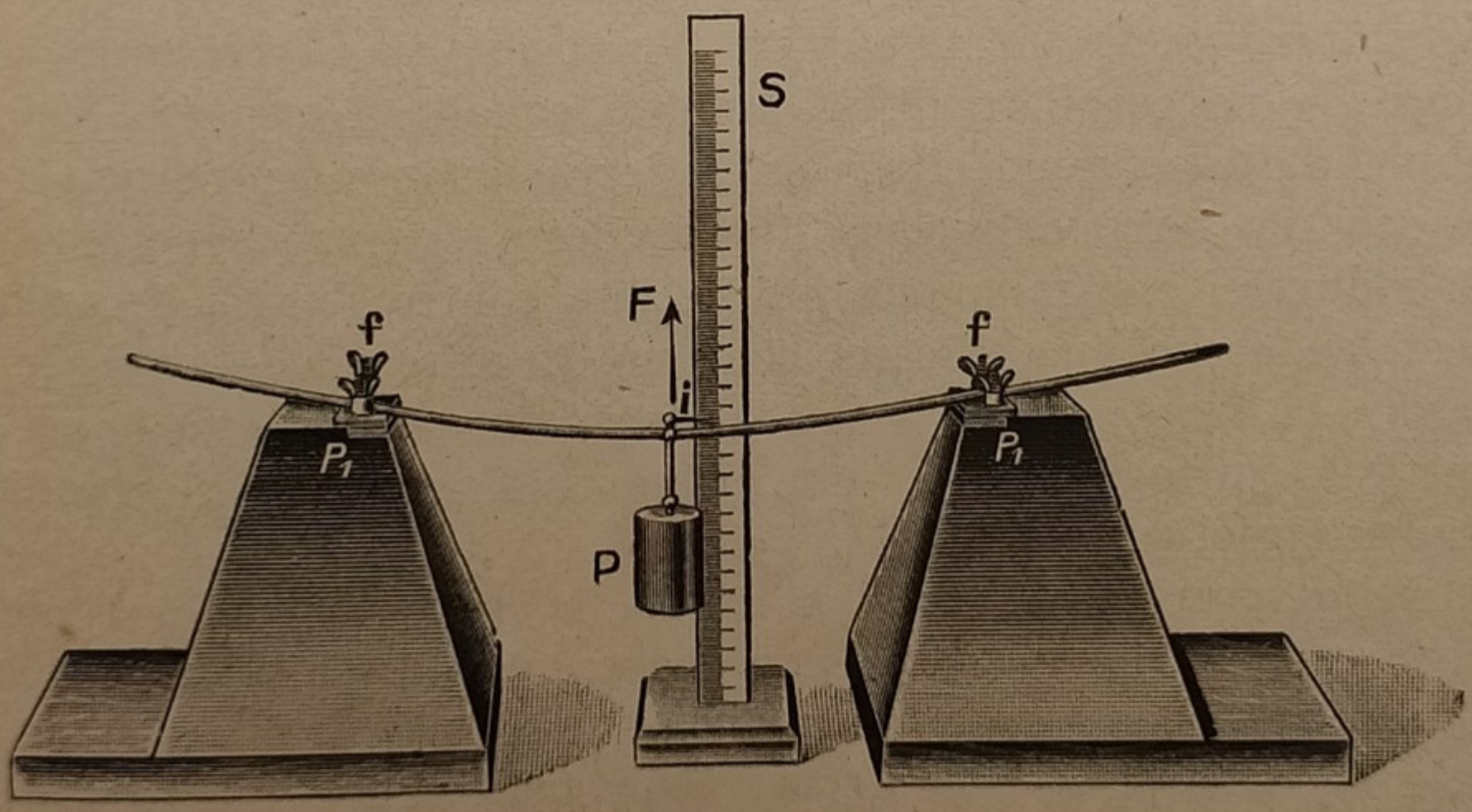

Fig. 87.

Se si sospende un corpo P nel punto di mezzo di una lamina elastica appoggiata agli estremi (fig. 87), si osserva che la lamina si piega fino al punto che la risultante F delle forze elastiche che vi si destano arriva a equilibrare il peso P del corpo; sarà cioè $F = P$. Se in seguito al corpo P se ne sostituisce un altro più pesante, la sbarra si fletterà maggiormente

e quindi maggiore riescirà la reazione F dovuta all'elasticità, ma tal forza raggiungerà anche in questo caso un'intensità eguale al peso del corpo. Il risultato finale sarà sempre che all'*azione* — peso del corpo — corrisponderà una *reazione* — forza elastica della molla — eguale e contraria.

Una calamita attira un pezzo di ferro, ma questo attira la calamita, come si può provare mettendo la calamita a galleggiare sopra l'acqua poggiandola su un pezzo di sughero e accostandovi un pezzo di ferro.

La Terra attira i corpi che stanno alla sua superficie, ma questi attirano egualmente la Terra verso di loro, di modo che se si potesse immobilizzare il corpo, dovrebbe la Terra muoversi verso i corpi stessi.

Nei casi in cui i due corpi, fra i quali si esercitano le due forze — azione e reazione — sieno ambedue liberi di muoversi si avrà, come conseguenza di quanto è stato detto sulle quantità di moto alla fine del § 19, che le forze agenti, perchè sono eguali, dovranno alla fine di un tempo qualsiasi aver comunicato ai due corpi quantità di moto eguali ed opposte. Tale è anche il caso sopra citato della Terra; quando un corpo sollevato da terra è lasciato libero, Terra e corpo sono liberi di muoversi e si muovono infatti l'un contro l'altro, il corpo scendendo con una velocità che può divenire anche assai elevata e la Terra salendo verso il corpo con una velocità impercettibile, in ragione della sua massa enormemente più grande di quella del corpo.

Nello sparo di un'arma da fuoco, la violenta combustione della carica determina una pressione contro il fondo dell'arma e una pressione eguale e contraria sulla base del proiettile, di modo che arma e proiettile acquistano eguali quantità di moto. Se M, m, V, v sono rispettivamente le masse e le velocità dei due corpi, in ogni istante del tempo che dura l'azione dell'esplosivo, e quindi anche nell'istante in cui il proiettile abbandona l'arma, si ha l'eguaglianza:

$$MV = mv\ ;$$

cioè:

$$V : v = m : M\ ,$$

vale a dire le velocità dei due corpi sono inversamente proporzionali alle masse.

Il nostro fucile da guerra Mod. 91 ha una massa di 3900 grammi-massa, la pallottola di 10,45 grammi-massa, che parte dal fucile con la velocità di 700^{m} al secondo. Il fucile rincula con la velocità di $1^{m},87$.

21. Moto dei gravi liberi e sul piano inclinato. — In altre occasioni è stato detto che la forza di gravità determina la caduta di un corpo lasciato libero. Tal forza è un caso della gravitazione universale scoperta dal Newton e della quale questo sommo scienziato dette le leggi, contenute nella formola:

$$F = k \frac{Mm}{r^2}$$

nella quale F è la forza mutua attrattiva esercitantesi tra il corpo e la Terra, ossia il peso del corpo; M ed m sono le masse della Terra e del corpo ed r la distanza del corpo dal centro della Terra. Il coefficiente k ha un valore numerico di $6,6 \times 10^{-8}$ se le masse vengono misurate in *grammi-massa*, r in *centimetri*, ed F in *dine*; tale coefficiente vien detto *costante della gravitazione universale*. In concreto significa che due masse ciascuna di 1 grammo-massa, messe a 1 cm. di distanza, si attirano con la forza di $6,6 \times 10^{-8}$ dine.

La formola sopra riportata dice che il peso di un corpo varia con r, ossia con la distanza dal centro della Terra, e diminuisce coll'aumentare di questa. L'esperienza eseguita inizialmente dal P. Ximenes e ripetuta con qualche variante più tardi dal Jolly prova tal fatto.

Ad un'altezza di 25 metri dal suolo venne posta una bilancia di precisione, la quale portava due piatti H e H' (fig. 88), come una bilancia ordinaria, e al disotto del piatto H' un altro piatto H'' alla distanza di 25 metri.

Un blocco da 5 kg., posto sul piatto H' veniva equilibrato con della tara posta sul piatto H; dopo di che il blocco sud-

detto veniva portato sul piatto H''. Il giogo si abbassava da questa parte, per l'aumentato peso del blocco abbassato di 25 metri, e per ristabilire l'equilibrio occorreva caricare 37 milligrammi sul piatto H.

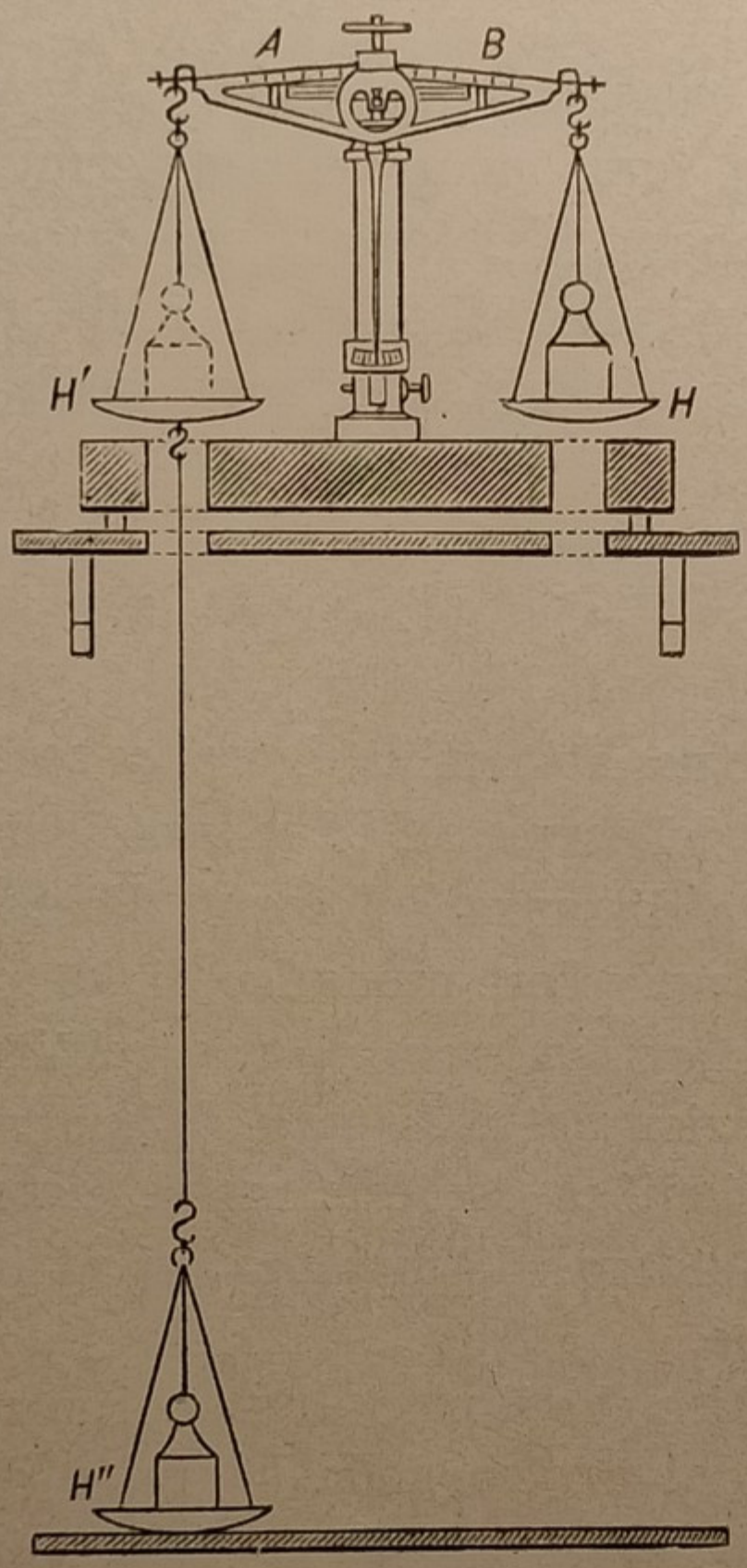

Fig. 88.

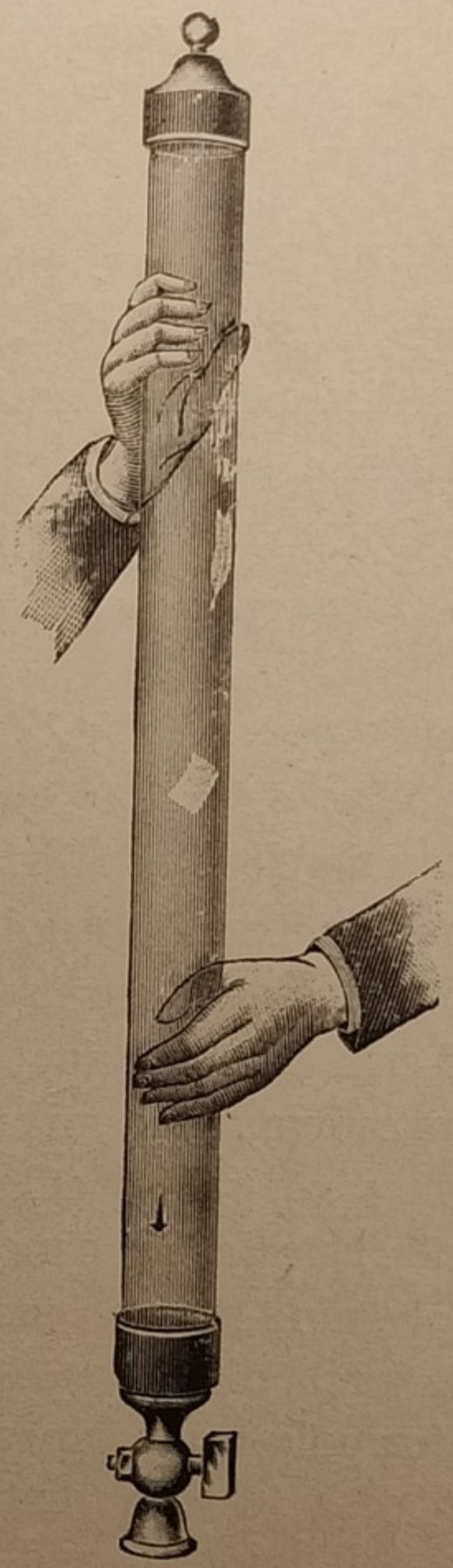

Fig. 89.

Con ciò rimane provato che un blocco di un chilogrammo coll'abbassamento di 25 metri, subisce un aumento di peso di $37 : 5 = 7{,}4$ milligrammi.

Tuttavia tale variabilità non produce effetto sensibile finchè si tratta di piccole differenze di altezza, ed è perciò che quando un corpo discende da piccola altezza potremo ammettere,

senza sensibile errore, che il suo peso sia una forza costante.

Ciò premesso, vediamo come si effettua la *caduta libera*, cioè la *caduta nel vuoto* dei gravi.

Tutti i corpi cadendo nel vuoto acquistano la stessa accelerazione; ciò è dimostrato con il *tubo di Newton*. Esso è un tubo cilindrico (fig. 89) in vetro, lungo da 1,50 a 2 metri, del diametro da 7 ad 8 centimetri, ed è terminato alle estremità da due guerniture metalliche, una delle quali porta un rubinetto e un giunto da poterlo avvitare alla macchina pneumatica. Si pongono nel tubo vari corpi: una pallina di piombo, un pezzetto di sughero, una barba di penna, ecc. Dopo fatto il vuoto, si rovescia rapidamente il tubo; tutti i corpi cadono e arrivano insieme alla estremità inferiore.

Lasciando rientrare un po' d'aria e rifacendo la prova, i corpi leggeri sono in ritardo tanto più forte quanto maggiore è la quantità d'aria immessa nel tubo.

Il ritardo dovuto alla resistenza dell'aria si mostra anche posando sopra una moneta, di dimensioni un po' grandi, un pezzetto di carta più piccolo; tenendo la moneta orizzontalmente la si lascia cadere da una certa altezza. Il metallo apre il passaggio alla carta e la sottrae alla resistenza dell'aria e la carta cade come nel vuoto, colla stessa velocità del metallo.

Fig. 90.

La *caduta dei liquidi* è ugualmente modificata per la presenza dell'aria, e lo si dimostra col *martello ad acqua* (fig. 90). Esso è un tubo di vetro riempito per circa due terzi d'acqua; dopo aver fatto bollire l'acqua per pochi istanti, per cacciar l'aria, il tubo viene chiuso alla lampada. Rovesciandolo bruscamente, l'acqua cade in blocco e colpisce il fondo col rumore secco metallico di un colpo di martello. Nell'aria invece i liquidi cadono suddividendosi in goccioline per l'interposizione di particelle d'aria. Per ora ci accontenteremo di queste prove grossolane, per dimostrare che la caduta dei diversi corpi si compie nello stesso luogo con la stessa accelerazione, ma più tardi (24) ne daremo una prova rigorosa. Ma intanto bisogna avvertire che se si tratta di corpi

molto pesanti e poco voluminosi, come delle sferette metalliche, e di velocità non grandi, l'influenza perturbatrice dell'aria riesce trascurabile.

Il rapido aumento della velocità acquistata da un corpo cadente rende difficile la misura precisa dello spazio percorso, perchè un piccolo errore nel computo del tempo porta un errore notevole nello spazio. In vista di ciò gli Scienziati si sono proposti di *rallentare* il movimento, senza cambiarne la legge; il rallentamento facilita le misure ed inoltre la diminuzione di velocità rende insensibile la resistenza dell'aria.

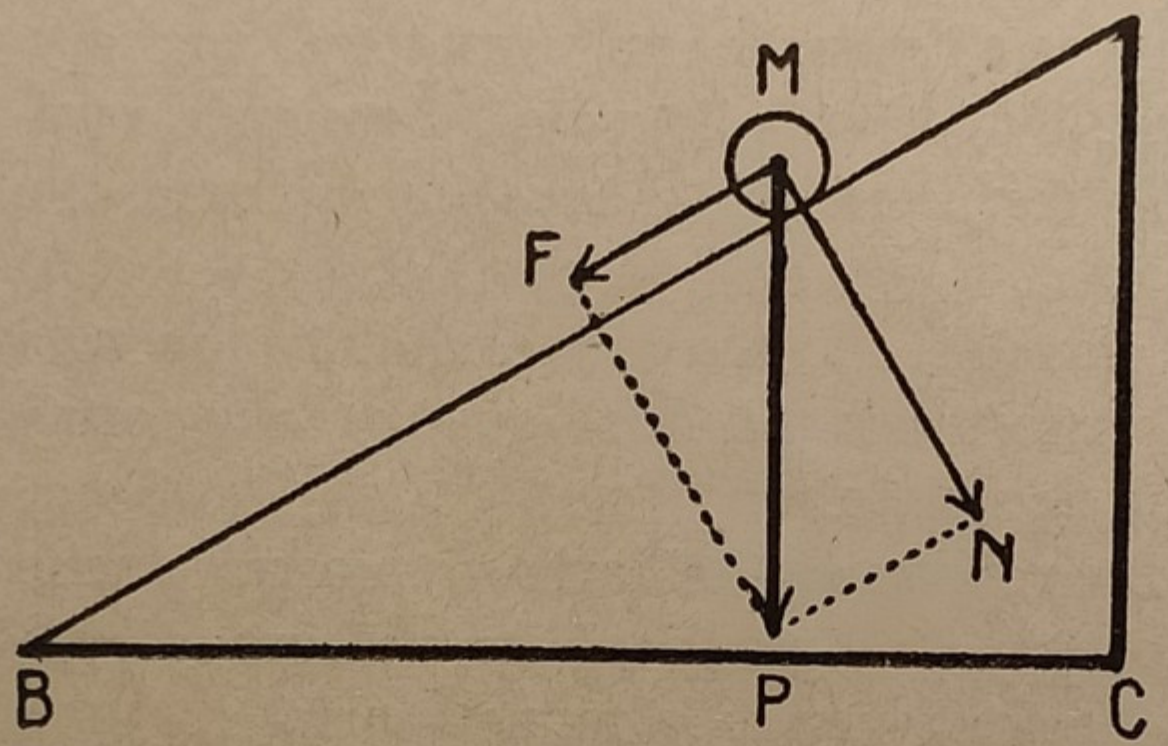

Fig. 91.

Tra i diversi artifizi usati diremo del *piano inclinato di Galileo*. Il Galileo studiò la discesa dei gravi lungo un piano inclinato, riducendo al minimo gli attriti, servendosi di un piano molto levigato e di una sferetta che lasciava rotolare lungo il piano.

La figura 91 rappresenta il piano inclinato con le caratteristiche note (16).

La forza F, componente del peso P del corpo in direzione parallela alla lunghezza del piano, è la forza che determina la discesa del corpo lungo il piano ed è noto che è legata al peso P del corpo e agli elementi del piano dalla formola:

$$F = P \frac{h}{l} . \qquad (1)$$

Questa equazione dice chiaramente che la forza F per un dato corpo e per un dato piano mantiene un'intensità costante, poichè il rapporto $\frac{h}{l}$ rimane costante e costante rimane anche P per la piccola altezza del piano. Sicchè in omaggio alla se-

conda legge della dinamica (18) il corpo, soggetto a una *forza costante*, acquista anche un'*accelerazione costante*, ossia un *moto uniformemente accelerato* (6). Per cui, se la lunghezza AB del piano viene divisa in 16 parti eguali, si riscontra che il corpo percorre spazi 1, 4, 9, 16, in tempi 1, 2, 3, 4; cioè *gli spazi percorsi, a partire dalla quiete, sono proporzionali ai quadrati dei tempi impiegati a percorrerli.*

Questa legge che noi qui deduciamo dalla 2ª legge della dinamica, fu scoperta dal Galilei sperimentalmente, e il Galilei stesso constatò che essa valeva per tutte le inclinazioni del piano, e logicamente concluse che fosse valida anche quando il piano, per aumento progressivo della inclinazione, fosse per diventare verticale. Fu così che il Galilei scoperse la legge della caduta verticale dei corpi.

La discesa di un corpo verticalmente o lungo un piano inclinato avviene dunque colla stessa legge; c'è solo differenza nell'accelerazione. Ciò infatti apparisce dividendo la formola (1) per la massa m del corpo:

$$\frac{F}{m} = \frac{P}{m} \quad \frac{h}{l},$$

ossia:

$$a = g \frac{h}{l}. \qquad (2)$$

Questa mostra che l'accelerazione a lungo il piano è una frazione dell'accelerazione di gravità g, tanto più piccola quanto più piccolo è il rapporto fra l'altezza e la lunghezza del piano.

Misure eseguite con un metodo che verrà descritto in seguito (24) dànno per g un valore di circa 980 centimetri al secondo; cosicchè un corpo che cade verticalmente percorre in un tempo t uno spazio (6).

$$s_t = \frac{1}{2} g t^2,$$

ossia nel 1° secondo percorre 4,90 metri
in 2 secondi percorre $4{,}90 \times 4 = 19{,}60$ metri
in 3 » » $4{,}90 \times 9 = 44{,}10$ »
. . . . . .
in 10 » » $4{,}90 \times 100 = 490$ »

22. Pendolo semplice. — Si dice *pendolo* un corpo qualunque pesante mobile intorno ad un asse orizzontale fisso, detto asse di sospensione, che sta al disopra del suo centro di gravità. Tale pendolo viene anche detto *pendolo fisico* o *pendolo composto*, per distinguerlo dal pendolo semplice.

Un *pendolo semplice* è formato di un punto materiale pesante A (fig. 92) sospeso a una delle estremità d'un filo inesten-

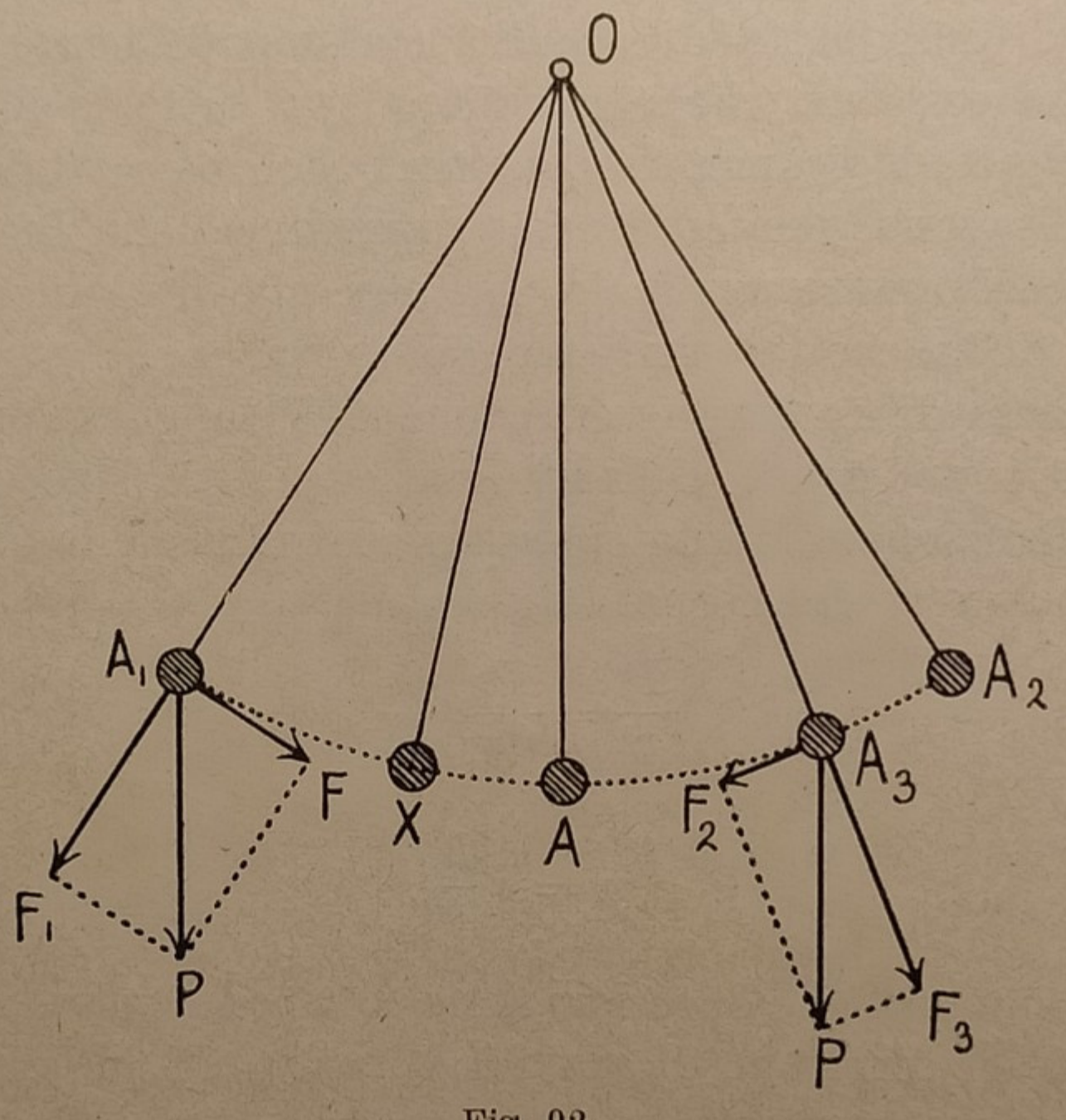

Fig. 92.

sibile e senza peso; l'altra estremità del filo è sostenuta da un punto fisso O. Questo, come si comprende, è un pendolo ideale e serve per stabilirne teoricamente le leggi del movimento.

Il movimento d'un pendolo è dovuto al suo peso. Quando il filo è lasciato verticale, il peso di A agente nella direzione del filo è equilibrato dalla resistenza del punto fisso e il pendolo è in riposo. Se invece lo si porta in OA_1 e lo si abbandona, si mette ad oscillare da una parte e dall'altra del punto A in un piano verticale invariabile. Infatti il peso A_1P del pendolo si decompone secondo la regola del parallelogramma in

due forze A_1F_1 e A_1F nel piano $PA'O$. La componente A_1F_1 che agisce nella direzione del filo, ha per solo effetto di tenderlo; la componente perpendicolare A_1F produce il movimento. Questa componente rimane sempre nel detto piano, quindi il punto A_1 resta in tal piano e descrive un arco di circonferenza di centro O.

Notisi tuttavia che mentre la discesa di un grave lungo un piano inclinato (21) si effettuava con moto uniformemente accelerato, perchè la forza agente si manteneva costante, nel caso del pendolo la componente attiva A_1F va diminuendo mentre il corpo si avvicina alla posizione di riposo, di guisa che il moto del pendolo sarà *accelerato*, ma non uniformemente.

Il pendolo giunge in A con la velocità massima ed oltrepassa tal posizione per inerzia; ma allora la componente del peso in direzione perpendicolare al filo, che per una certa posizione A_3 del pendolo è la A_3F_2, agisce come forza *ritardatrice*, ed il pendolo per conseguenza si muove con moto *ritardato*.

Non sarebbe difficile dimostrare che dopo aver percorso in salita l'arco AA_2, eguale all'arco A_1A, il pendolo ha velocità zero, per conseguenza ritorna verso A, dove giunge con moto *accelerato* acquistandovi la stessa velocità che aveva nel passaggio precedente per lo stesso punto. Per le ragioni sopra esposte, il pendolo sale in seguito con moto *ritardato* fino in A_1, arrivandovi con velocità zero, e da questo istante riprende il suo moto con la stessa vicenda.

La componente efficace che produce il moto del pendolo è dunque massima nelle posizioni estreme, e nulla nella posizione di riposo e si dimostra che per una posizione qualsiasi X del pendolo, si può ritenere proporzionale allo spostamento XA dalla posizione di riposo, alla condizione però che l'arco A_1A abbia piccola ampiezza.

L'ampiezza dell'arco AA_1 si dice *ampiezza dell'oscillazione*, che noi supporremo sia molto piccola, in pratica tale che non superi i 2° o 3°.

Il passaggio del pendolo da A_1 ad A_2 si dice oscillazione *semplice*, e la somma di un'andata e di un ritorno oscillazione *completa*.

Il moto del pendolo è un caso speciale di *moto oscillatorio* (7).

Per *piccole* oscillazioni, cioè per oscillazioni di piccola ampiezza, la Meccanica razionale porta alla seguente formola, che dà il *periodo* T, ossia la durata d'una oscillazione completa:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \qquad (1)$$

nella quale T è il periodo misurato in secondi, l la lunghezza del pendolo e g l'accelerazione della gravità nel luogo dove il pendolo oscilla. Dalla formola apparisce che T è indipendente dall'ampiezza. Ciò a rigore non corrisponde al vero; il periodo è veramente funzione dell'ampiezza, e cresce con questa; infatti è dimostrato che per ampiezze non molto piccole, il periodo è misurato dal prodotto di $2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ per un numero che cresce al crescere dell'ampiezza. La formola (1) che diremo *formola elementare del pendolo* è tuttavia sufficiente nel maggior numero dei casi; infatti si dimostra che per ampiezza di 2°,5 il periodo *vero* differisce da quello calcolato colla formola elementare a meno di $\frac{1}{2000}$.

Le oscillazioni del pendolo obbediscono a quattro leggi:

1° *Le piccole oscillazioni di uno stesso pendolo sono isocrone, cioè si compiono nello stesso tempo.*

2° *Il periodo è indipendente dalla massa del pendolo e dalla sostanza di cui è formato.*

3° *Il periodo è direttamente proporzionale alla radice quadrata della lunghezza.*

4° *Il periodo è inversamente proporzionale alla radice quadrata dell'accelerazione della gravità nel luogo dove il pendolo oscilla.*

La 3ª e la 4ª legge sono evidentemente esplicite nella formola (1) sopra esposta.

La 2ª, sotto altra forma, non è altro che la legge enunciata nel § 21, per cui nello stesso luogo tutti i corpi cadono colla stessa accelerazione.

Tali leggi però, che fin qui vanno considerate come semplici deduzioni matematiche, a rigore non sarebbero verificabili, perchè un pendolo semplice non si può realizzare.

Si può tuttavia con facilità preparare un pendolo, che equivale con grande approssimazione a un pendolo semplice, con una piccola sfera sospesa ad un filo di peso trascurabile. Si può ritenere che questo pendolo si comporti come un pendolo semplice avente per lunghezza la distanza dell'asse di sospensione dal centro della sfera. Il calcolo infatti dimostra che usando una sfera del raggio di 1 centimetro, se la distanza dell'asse di sospensione dal centro della sfera è 1 metro, la lunghezza del pendolo semplice isocrono, cioè che ha la stessa durata di oscillazione, è di metri 1,00004.

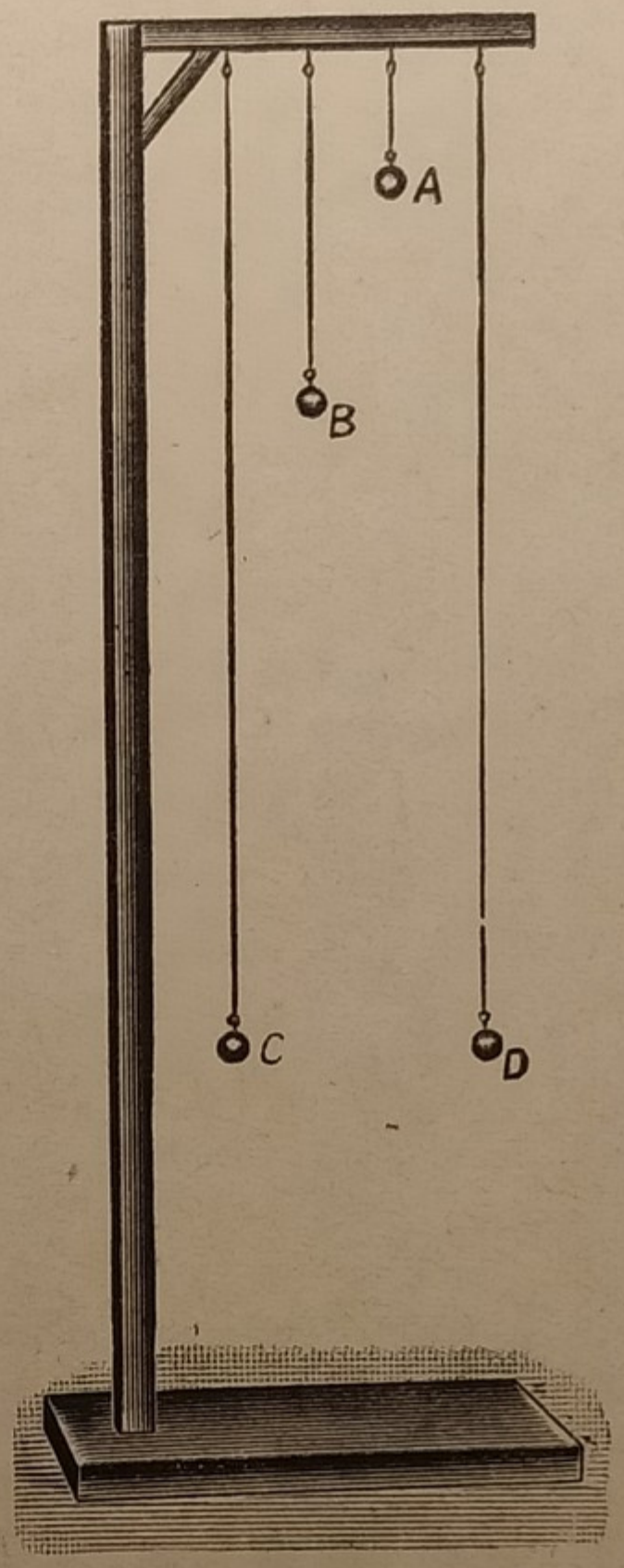

Fig. 93.

Per la verifica delle tre prime leggi ci serviremo adunque di pendoli formati con delle sferette sostenute da leggeri cordoncini: così la 1ª legge si verifica mettendo in moto un pendolo, di guisa che le prime oscillazioni abbiano piccola ampiezza; con un cronometro si determina la durata di 100 oscillazioni, e poi la durata di altre 100 e così di seguito. L'ampiezza delle successive oscillazioni va gradualmente diminuendo per ragione degli attriti e della resistenza dell'aria. Malgrado ciò si constata che la durata delle diverse serie rimane invariata.

Per verificare la 2ª legge si formano due pendoli con due sferette, una, ad esempio, di sughero *D*, l'altra di piombo *C* (fig. 93), sospese a fili della stessa lunghezza; si riscontrerà facilmente che il periodo è perfettamente lo stesso.

Per la 3ª legge si costruiscono col detto sistema dei pendoli (fig. 93) lunghi 1, 4, 9 rispettivamente, ad es. 20, 80, 180 centimetri; usando un semplice cronometro a scatto, si riscontra che 30 oscillazioni del primo, 15 del secondo, 10 del terzo hanno la stessa durata; cioè che i periodi stanno fra loro come 1 : 2 : 3 .

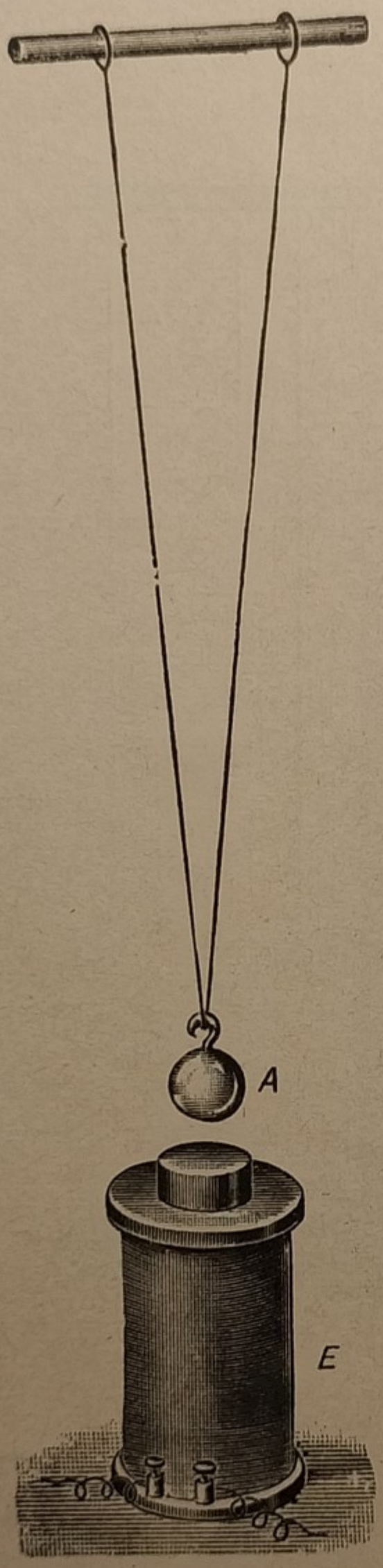

Fig. 94.

Per la 4ª legge ci limiteremo a fare una verifica semplicemente qualitativa, ossia a verificare che il periodo *diminuisce* col *crescere* dell'accelerazione, ossia della forza agente sul pendolo.

A è una pallottola di ferro sospesa ad un doppio cordoncino (fig. 94); sotto di essa è posta una elettrocalamita *E* (1). Si fa oscillare il pendolo quando la elettrocalamita è inattiva; in tal caso il pendolo oscilla sotto l'azione della sola gravità.

Si eccita poi la elettrocalamita, nel qual caso la sferetta è soggetta a una forza maggiore, perchè all'azione della gravità si aggiunge quella della calamita; si osserverà che le oscillazioni si compiono con maggiore rapidità.

23. Pendolo composto e geodetico; misura di *g*. — Si è già detto al principio del paragrafo precedente che il pendolo *composto* o *fisico* è un corpo qualunque pesante, libero di oscillare intorno a un asse orizzontale che sta sopra il centro di gravità.

Le leggi del pendolo sopra enunciate, dimostrate dalla meccanica razionale,

(1) Un'elettrocalamita è formata di un cilindretto di ferro dolce sopra il quale è avvolto in molti giri un filo di rame ricoperto di

sono a rigore le leggi del pendolo semplice, che è, come ben si comprende, irrealizzabile. Si può tuttavia realizzare un pendolo fisico, che equivale perfettamente a un pendolo semplice di nota lunghezza; tale è il *pendolo geodetico*, detto anche pendolo *reversibile* o di *Kater* (fig. 95).

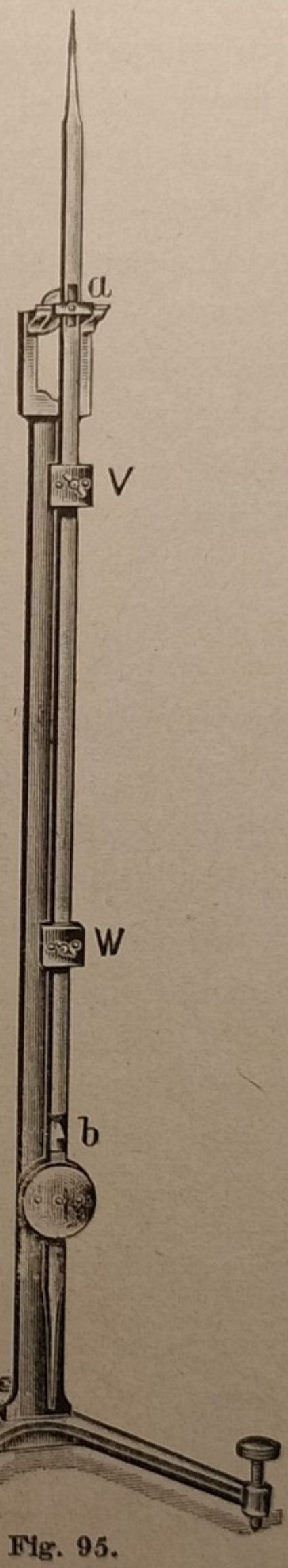

Fig. 95.

Esso è costituito di un regolo metallico, che porta fissi verso le estremità due coltelli, ossia due prismi di acciaio *ab* triangolari cogli spigoli paralleli posti di fronte, nel piano dei quali giace il centro di gravità del pendolo, che deve però trovarsi a distanze disuguali dagli spigoli.

Una massa lenticolare è fissata all'asta verso una estremità e due altre masse *V* e *W*, riunite a due corsoi mobili sull'asta, sono poste fra i due coltelli. Tale pendolo può esser fatto oscillare poggiando l'uno o l'altro dei due coltelli sopra un piano orizzontale di pietra dura ben levigata, che sta alla estremità superiore di una robusta colonna metallica, montata su tre piedi con viti di livello.

Si comincia col farlo oscillare sopra uno dei coltelli e successivamente sull'altro, e si riscontrerà che in generale il periodo avrà nei due casi diverso valore. Si spostano allora le masse *V* ed *W*, in modo che, ripetendo la prova di prima, la differenza tra i due periodi risulti minore. E così si continua, ripetendo con cura l'operazione finchè si arrivi ad ottenere la perfetta eguaglianza dei due periodi.

---

seta o di cotone per tutta la sua lunghezza. Il nucleo di ferro che non è naturalmente calamitato, lo diventa facendo passare una corrente elettrica nel filo di rame, e cessa di esserlo al cessare della corrente.

Se allora, mediante la formola del pendolo, indicata nel precedente paragrafo, calcoliamo la lunghezza l del pendolo semplice che ha lo stesso periodo del pendolo reversibile, riscontriamo che essa è perfettamente eguale alla distanza degli spigoli *ab* dei due coltelli. Dunque il pendolo reversibile, regolato come s'è detto, è assimilabile a un pendolo semplice di lunghezza nota, che è la distanza fra i due coltelli.

Ciò posto, le leggi del pendolo si potranno esattamente verificare e di più potremo servirci del pendolo reversibile per misurare il valore di g in un luogo qualunque. Basta perciò misurare con esattezza il periodo T di oscillazione del detto pendolo e servirci della formola nota, che risolta rispetto a g diviene:

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$$

sostituendo in questa i valori noti di T e di l.

24. Applicazioni del pendolo. — Fra tutte, diciamo della misura dell'accelerazione della gravità mediante il pendolo, e dell'applicazione di questo agli orologi. Per la misura di g si usa un pendolo geodetico del quale è nota l e si usa la formola anzidetta. Le misure eseguite mostrano che l'accelerazione della gravità è variabile da un luogo all'altro della superficie terrestre, come apparisce da pochi dati che qui riportiamo:

Equatore, al livello del mare	cm.	978,07	al secondo
Roma » »	»	980,38	»
Latitudine 45° » »	»	980,61	»
Torino	»	980,52	»
Parigi, al pavimento del Pantheon	»	981 —	»
Polo, dedotto da misure fatte in Lapponia	»	983,10	»

In maniera generale g varia dunque colla latitudine e cresce con questa, mentre diminuisce coll'altitudine. La dipendenza di g dall'altitudine fu discussa nel § 21. Riguardo alle variazioni di g colla latitudine la causa principale la riscontriamo

nella forza centrifuga che in misura variabile e con variabile direzione rispetto alla verticale, si sviluppa nei diversi punti della superficie terrestre per effetto della rotazione della Terra (25), e secondariamente nello schiacciamento polare della Terra, per cui un corpo posto al polo si trova circa 21 chilometri più vicino al centro della Terra di un corpo posto all'equatore; e per la legge di Newton (21) è quindi più fortemente attratto.

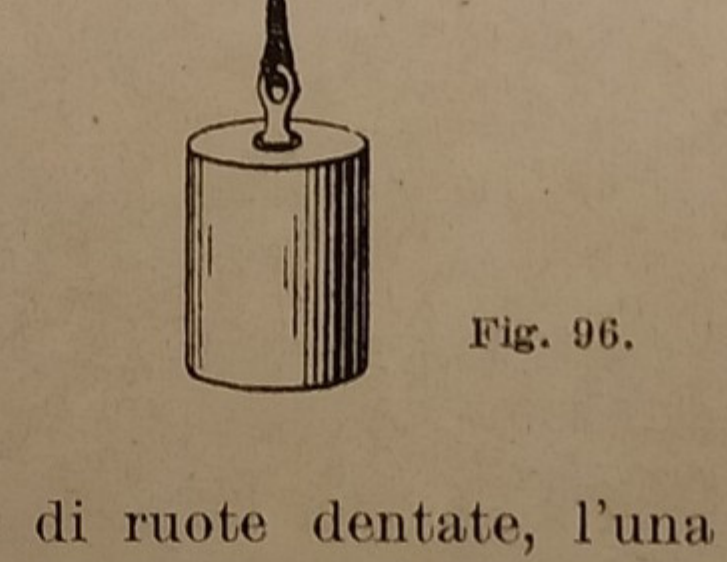

Fig. 96.

Un orologio ha come organi essenziali il *motore*, il *rotismo* detto anche *minuteria*, il *regolatore* e lo *scappamento*.

Il *motore* (fig. 96) può essere costituito da un peso fissato all'estremità di un cordoncino avvolto sopra un cilindro orizzontale T solidale con una ruota dentata R. Questa ruota tende ad assumere un movimento accelerato; ma in realtà ad essa è concesso solo di muoversi a scatti ad intervalli di tempo eguali. Qualche volta l'organo motore è una molla, come avviene negli orologi mobili in genere.

Il *rotismo* è formato di una serie di ruote dentate, l'una delle quali ingrana con la ruota dentata R del motore e ne trasmette il moto allo scappamento; gli assi di tre di queste ruote portano le lancette delle ore, dei minuti e dei secondi.

Il *regolatore* è formato spesso da un pendolo le cui oscillazioni mantengono un'ampiezza costante, malgrado l'attrito e la resistenza dell'aria, per il fatto che dagli organi dello scappamento esso riceve un piccolo impulso ad ogni oscillazione semplice.

Lo *scappamento* è l'organo che lega il pendolo al rotismo ed il più usato è lo scappamento ad *àncora* immaginato da Huygens nel 1657.

L'ultima ruota *R* del rotismo (fig. 97) porta 30 denti ed è trascinata dal motore nel senso della freccia *f*. Fra i denti di essa vengono a impegnarsi alternativamente le estremità, dette *arpioni*, di un pezzo *ABC* chiamato *àncora*, mobile intorno a un asse *D*. L'asse di rotazione *D* è solidale con un pezzo *F* (fig. 98) chiamata *forchetta*, tra le branche della quale è im-

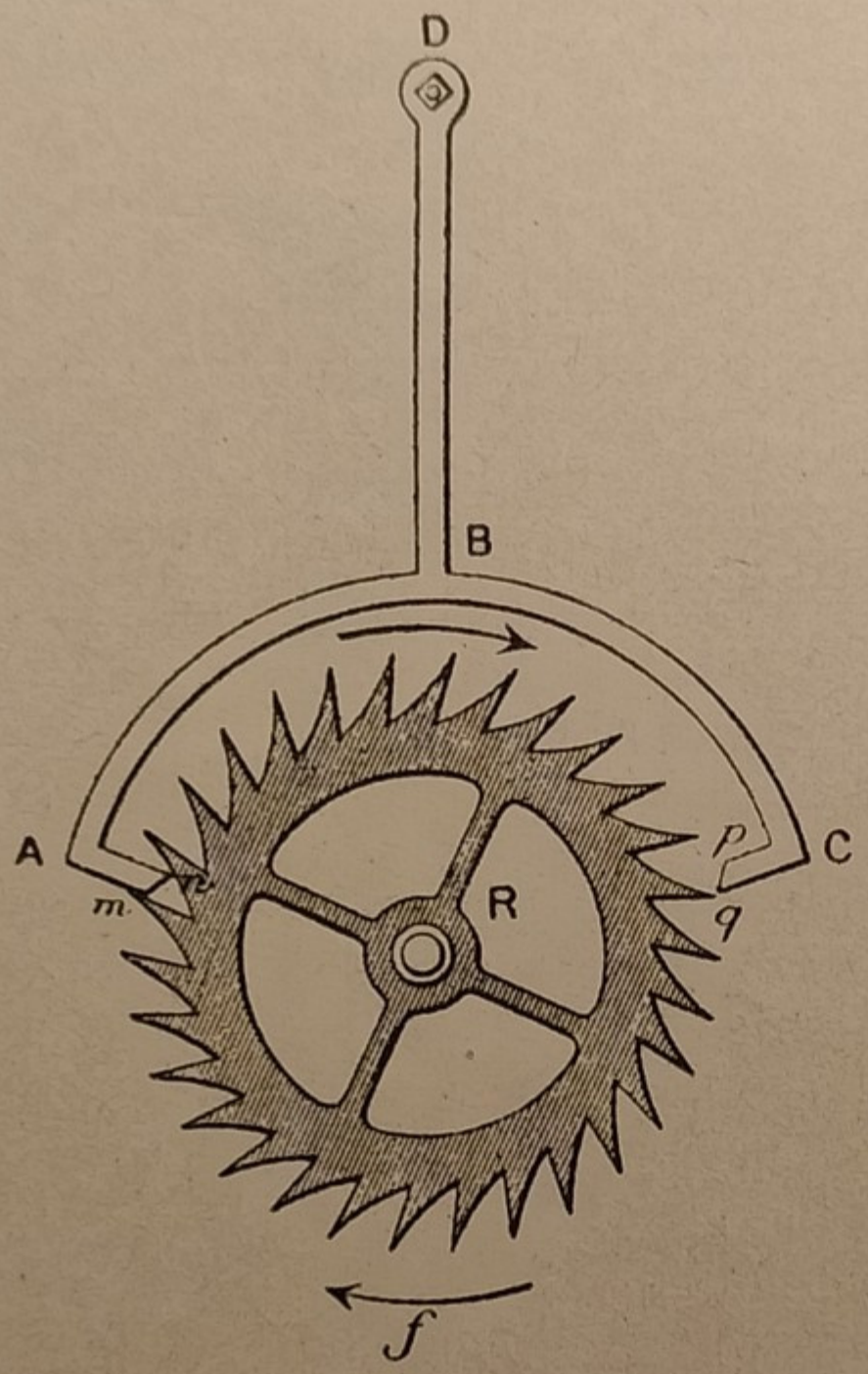

Fig. 97.

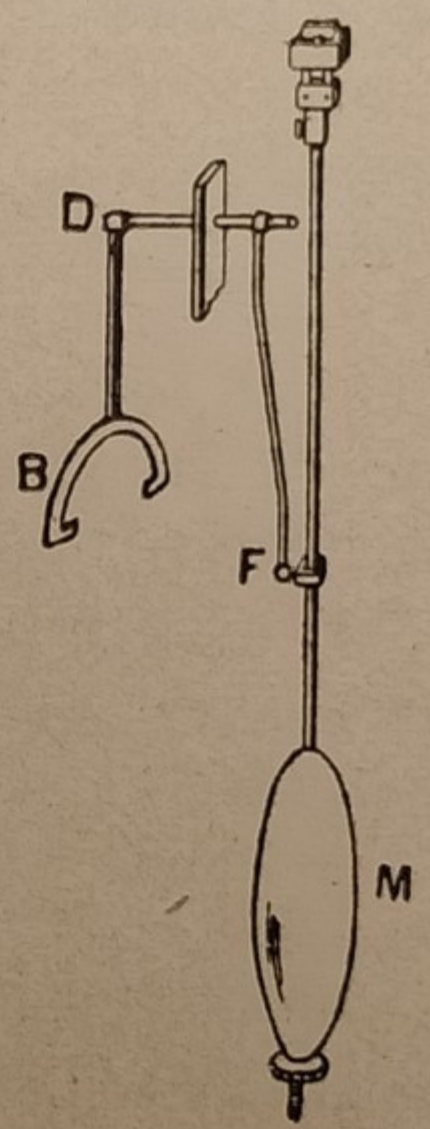

Fig. 98.

pegnata l'asta del pendolo *M*, di modo che l'ancora è mossa dal pendolo ed oscilla collo stesso periodo. In tal modo quando il pendolo si trova nella posizione estrema di sinistra o di destra uno degli arpioni dell'àncora, quello di destra o di sinistra, è impegnato contro i denti della ruota a scappamento e quindi il rotismo è in quegli istanti fermo. Quando però il pendolo scende verso la posizione di riposo, la ruota resta momentaneamente libera e compie una rotazione equivalente a $\frac{1}{60}$ di giro, perchè intanto il pendolo oltrepassa la posizione di riposo

e l'àncora produce un successivo arresto. Sicchè con tale disposizione la ruota dello scappamento fa un giro in 60 scatti che si seguono ad intervalli equivalenti alla durata di una oscillazione semplice del pendolo. Se la lunghezza del pendolo è regolata in modo che tale durata sia eguale a 1 secondo, la ruota dello scappamento fa un giro in 1 minuto e una lancetta unita al suo asse conta i secondi.

25. Dinamica del moto circolare uniforme - Forza centripeta e centrifuga. — Se un corpo si muove sopra una curva non può essere soggetto ad una sola azione, la quale produce soltanto un moto rettilineo; in altre parole un moto curvilineo qualsiasi è sempre un moto risultante da almeno due moti rettilinei. Nel caso specifico del moto circolare uniforme si potrebbe dimostrare che il corpo è soggetto in ogni istante ad una velocità costante diretta secondo la tangente alla circonferenza, e ad una forza pure costante per intensità, ma diretta sempre verso il centro. La velocità indicata non è altro che la velocità tangenziale di cui è detto nel § 7, e la forza, che vien detta *forza centripeta* appunto perchè è costantemente diretta verso il centro, ha il solo compito di inflettere in modo continuo la traiettoria del mobile, senza di che questo obbedirebbe solo alla velocità tangenziale, e per inerzia si muoverebbe con moto uniforme secondo la tangente.

Per comprendere la natura della forza centripeta, scegliamo qualche esempio. Se si fa ruotare un corpo attaccato all'estremo di una funicella, unita per l'altro estremo alla mano, la forza centripeta è costituita dalla coesione delle diverse parti della funicella. Altrettanto avviene per la ruota di un volano nella quale la forza centripeta è rappresentata dalla coesione fra le molecole della materia costituente i diversi raggi.

Nel caso della rotazione di un pianeta attorno al Sole, fa da forza centripeta l'attrazione a cui il pianeta è soggetto da parte del Sole.

Ma in tutti i casi avviene che contemporaneamente a tal forza per la legge dell'azione e reazione (20) si desta nel sistema ruotante un'altra forza *eguale e contraria*, che si chiama *forza centrifuga*.

Quando il corpo vien fatto ruotare attaccato alla funicella, di cui si è poco sopra parlato, la funicella si allunga qualche po', e nella sua tendenza a contrarsi esercita una trazione del corpo verso la mano — forza centripeta — e una trazione della mano verso il corpo — forza centrifuga. — Nel caso della rivoluzione di un pianeta attorno al Sole, l'attrazione, come si sa, è mutua, di guisa che la manifestazione di tal forza nel senso dal pianeta verso il Sole costituisce la forza centripeta, e la manifestazione della stessa forza nel senso che va dal Sole al pianeta, la forza centrifuga.

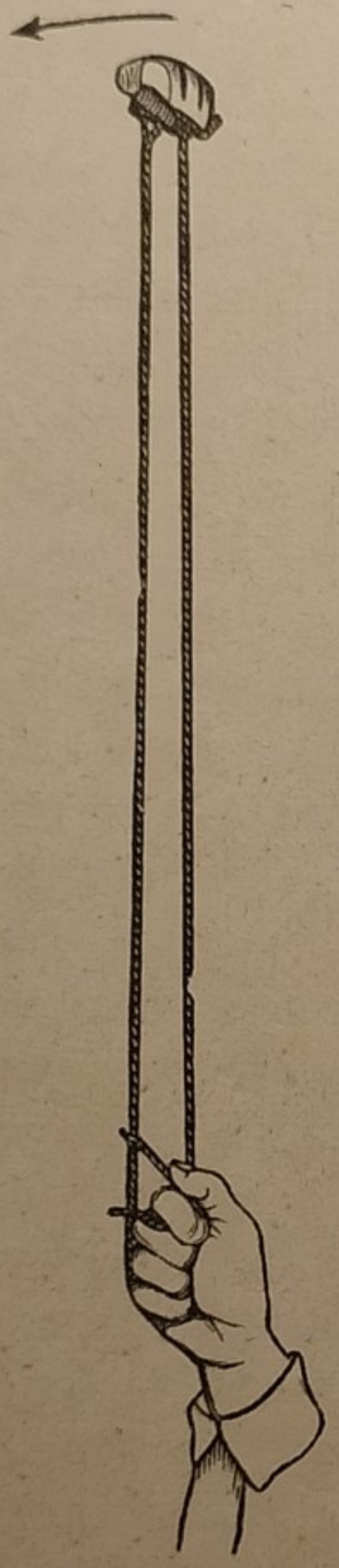

Fig. 99.

Si noti dunque che forza centripeta e forza centrifuga sono *coesistenti*, l'una non può sussistere senza l'altra, sicchè se si annulla la forza centripeta cessa ad un tempo anche l'altra, e il corpo obbedendo alla velocità posseduta si muove per inerzia lungo la tangente.

Ciò avviene, come è noto, nella fionda (figura 99), nella quale il corpo, dopo aver assunto una forte velocità di rotazione, sfugge rapidamente lungo la tangente, non appena, chi manovra l'apparecchio, lascia libero uno dei tratti della funicella che teneva il corpo avvinto alla mano. Il corpo sfugge dunque non per effetto della forza centrifuga, come talora si sente dire, ma per mancanza della forza centripeta.

La Meccanica razionale dimostra che la forza centripeta F necessaria a mantenere una massa m in moto uniforme con velocità v su un cerchio di raggio r, è data dalla formola:

$$F = \frac{mv^2}{r} \; ; \qquad (1)$$

ed essendo (7):

$$v = \frac{2\pi r}{T}$$

si ha anche:

$$F = \frac{4\pi^2 mr}{T^2} . \qquad (2)$$

Queste formole dànno la misura di F in dine se m è misurata in grammi-massa, r in centimetri e T in secondi.

Esse racchiudono le seguenti leggi della forza centrifuga o centripeta.

1ª *A parità di altre grandezze la forza centrifuga è proporzionale alla massa ruotante.*

2ª *A parità di altre grandezze è proporzionale al quadrato della velocità lineare, e anche, al quadrato della velocità angolare.*

3ª *La forza centrifuga è, a parità di massa e di periodo, direttamente proporzionale al raggio.*

4ª *A parità di massa e di velocità la forza centrifuga è inversamente proporzionale al raggio.*

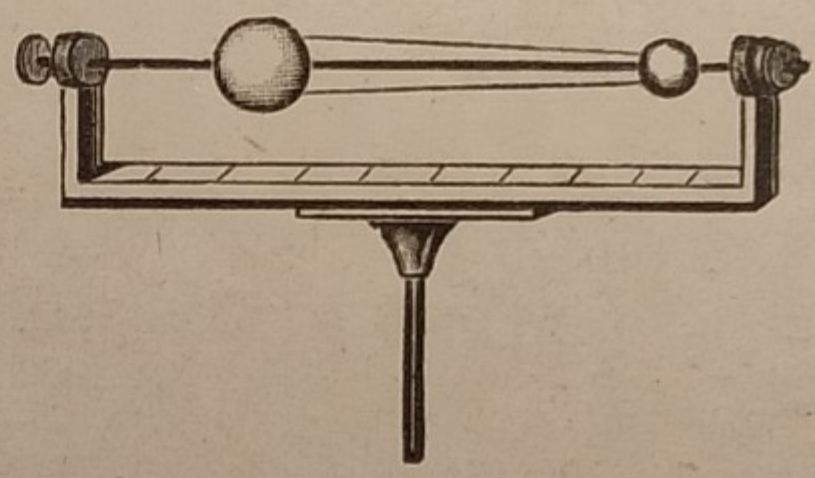

Fig. 100.

La 1ª e 3ª legge si possono verificare insieme coll'apparecchio della figura 100.

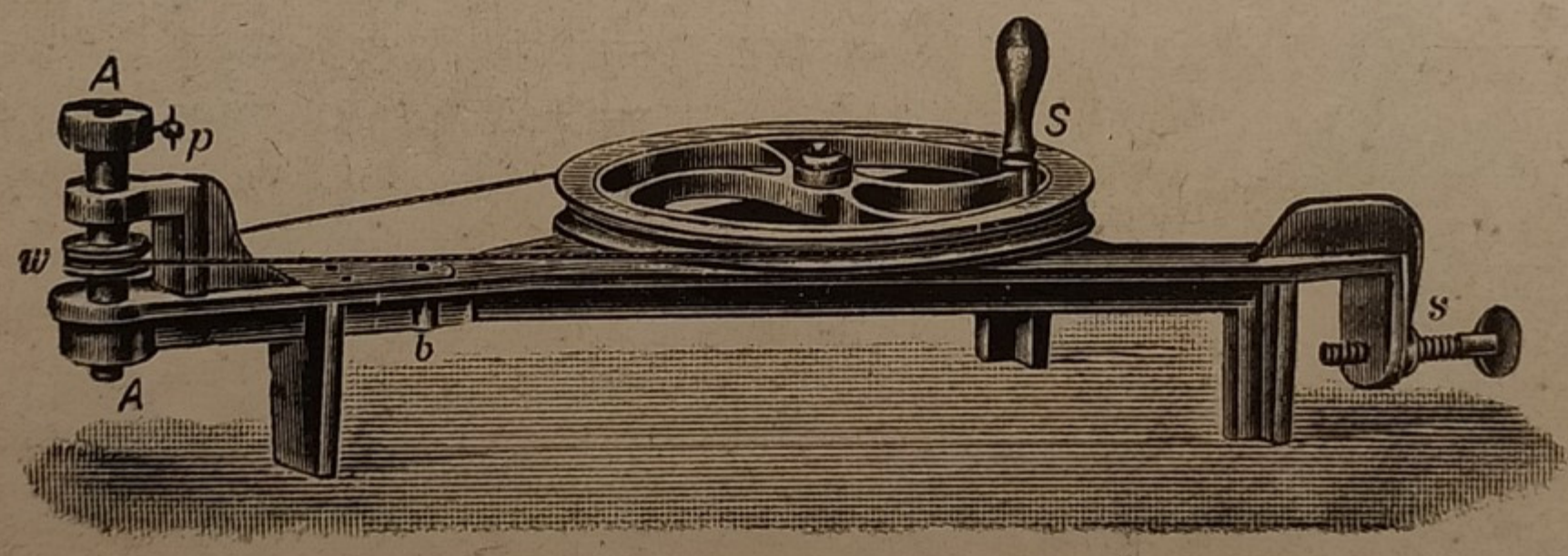

Fig. 101.

Due sfere hanno masse m ed m' che stanno fra loro in un certo rapporto, ad esempio, di 2 : 1. Tali sfere sono legate l'una coll'altra da due funicelle e possono scorrere lungo una verghetta metallica su cui sono infilate.

L'apparecchio viene montato sulla *macchina della forza centrifuga* (fig. 101), e le due sfere vengono in precedenza poste

in tal posizione che durante la rotazione, le forze centrifughe che su di loro si destano, sieno uguali e di senso contrario; se ciò si verifica, le due sfere durante la rotazione rimangono al loro posto. Per ottenere ciò applichiamo la (2).

Per la prima sfera abbiamo:

$$F = \frac{4\pi^2 mr}{T^2} \ ;$$

e per la seconda:

$$F' = \frac{4\pi^2 m'r'}{T^2} \ .$$

Da queste, poichè si vuole che sia $F = -F'$, si ottiene:

$$mr = -m'r' \ ;$$

cioè le due sfere vanno poste dalle parti opposte dell'asse di rotazione, in modo che in valore assoluto sia:

$$r : r' = m' : m \ .$$

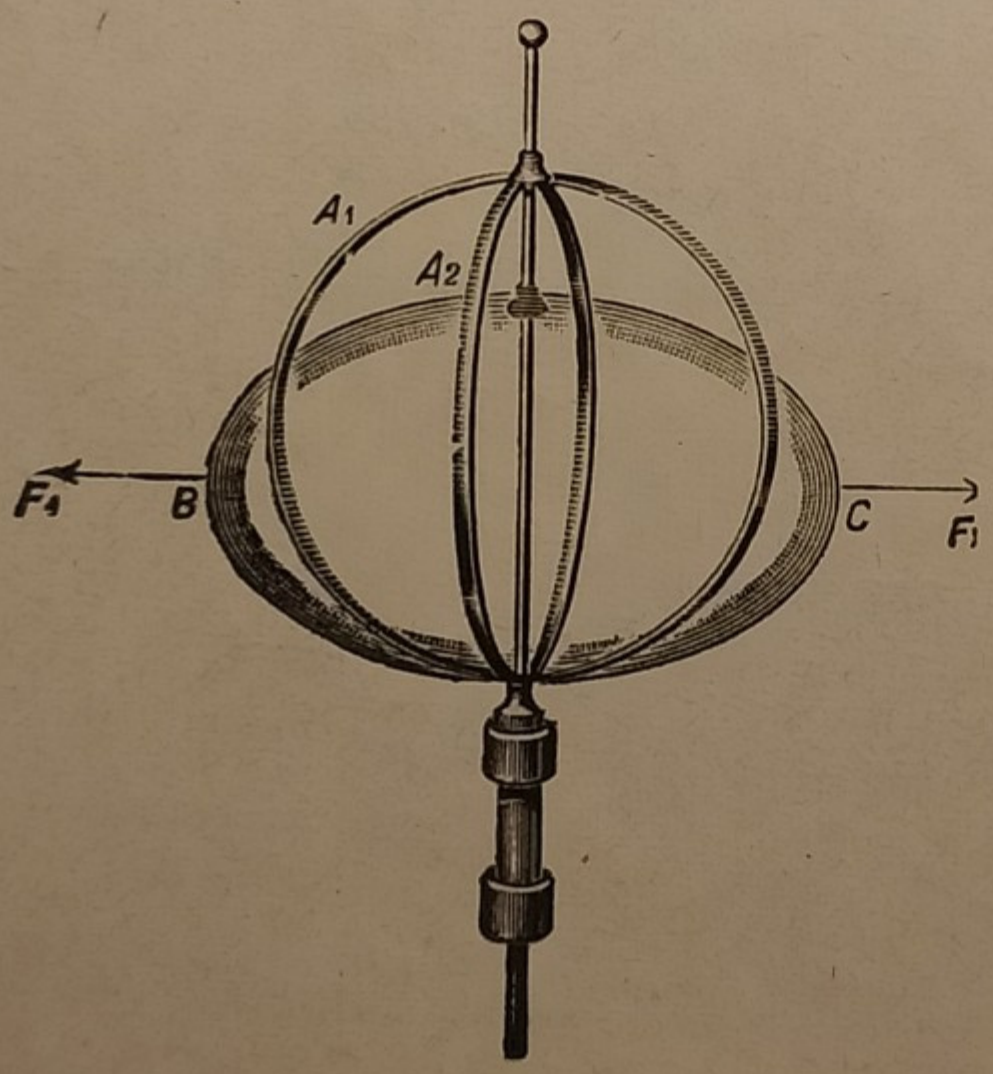

Fig. 102.

Nel caso nostro, poichè è supposto che $m' : m = 1 : 2$, dovrà essere: $r' : r = 2 : 1$. L'esperienza prova esattamente quanto la teoria ha preveduto.

Coll' apparecchio detto degli *anelli di Newton* (figura 102), si può imitare lo schiacciamento polare dei pianeti. Due anelli $A_1 A_2$ formati con una lamina flessibile di acciaio, sono fissati l'uno all'altro ad angolo retto e fatti ruotare mediante la macchina della forza centrifuga intorno al loro diametro verticale, forma to di una sbarretta sulla quale può liberamente scorrere un cerchietto fissato agli anelli più grandi nella parte superiore. Durante la rotazione gli anelli si deformano e generano un

solido di rivoluzione, schiacciato secondo l'asse di rotazione. Ciò dipende dal fatto che le forze centrifughe, sviluppantisi durante la rotazione sui singoli punti degli anelli, costituiscono due sistemi di forze parallele ed opposte, agenti rispettivamente sulle due metà di ciascun anello che stanno dalle parti opposte all'asse, sistemi che per ogni anello dànno luogo a due risultanti F_1 ed F_2 eguali e contrarie, applicate nei punti medi B e C dei semianelli, le quali producono evidentemente sulla lamina flessibile l'effetto descritto.

26. Effetti della forza centrifuga e applicazioni. — 1° Un secchio d'acqua, animato da rapido moto di rotazione in piano verticale, non lascia cadere il liquido nemmeno quando l'apertura è in basso, perchè la forza centrifuga che preme il liquido contro il fondo è superiore al suo peso (fig. 103).

Fig. 103.

2° Quando il fango aderente alle ruote di un veicolo in moto è soggetto a una forza centrifuga superiore all'adesione, si distacca secondo una tangente alla circonferenza del cerchione. E poichè la forza centrifuga aumenta in ragione del quadrato della velocità, è conveniente ai ciclisti di procedere lentamente sulle strade fangose.

3° È la forza centrifuga che tende a rompere i volani delle macchine, a dislocare le puleggie, a rovesciare all'esterno di una curva un veicolo, un treno, un ciclista, un cavallo al galoppo sopra una pista circolare.

Per ovviare a tali inconvenienti, per mezzo di masse metalliche, opportunamente disposte, si equilibrano le manovelle degli alberi delle macchine e delle ruote; si proteggono con scatole metalliche le spazzole circolari, le mole, le seghe circolari. Ciò per proteggere da gravi pericoli gli operai, che sarebbero altrimenti colpiti dai frammenti che tali apparecchi proiettano anche in via normale di funzionamento, e peggio dai frammenti dell'apparecchio se questo, per effetto della rapida rotazione, venisse a rompersi. Nei velodromi, nelle ferrovie, si

fa più alta la parte esterna della curva; così il cavallerizzo che sta in piedi sul cavallo che corre in giro, si piega verso l'interno.

Riguardo alle applicazioni vere e proprie industriali della forza centrifuga accenniamo agli *idroestrattori* (fig. 104), apparecchi usati nelle grandi lavanderie per asciugare rapidamente i panni bagnati. Sono costituiti essenzialmente d'una specie di paniere fatto di rete metallica o di lamina bucherellata $ABCD$, reso solidale con un albero verticale HK, che riceve il suo moto da un motore che lo fa girare a circa 2000 giri al minuto. I panni vengono posti nel paniere, il quale è circondato da un recipiente esterno MN che raccoglie l'acqua cacciata dalla forza centrifuga e la fa effluire all'esterno mediante un robinetto di scarico R.

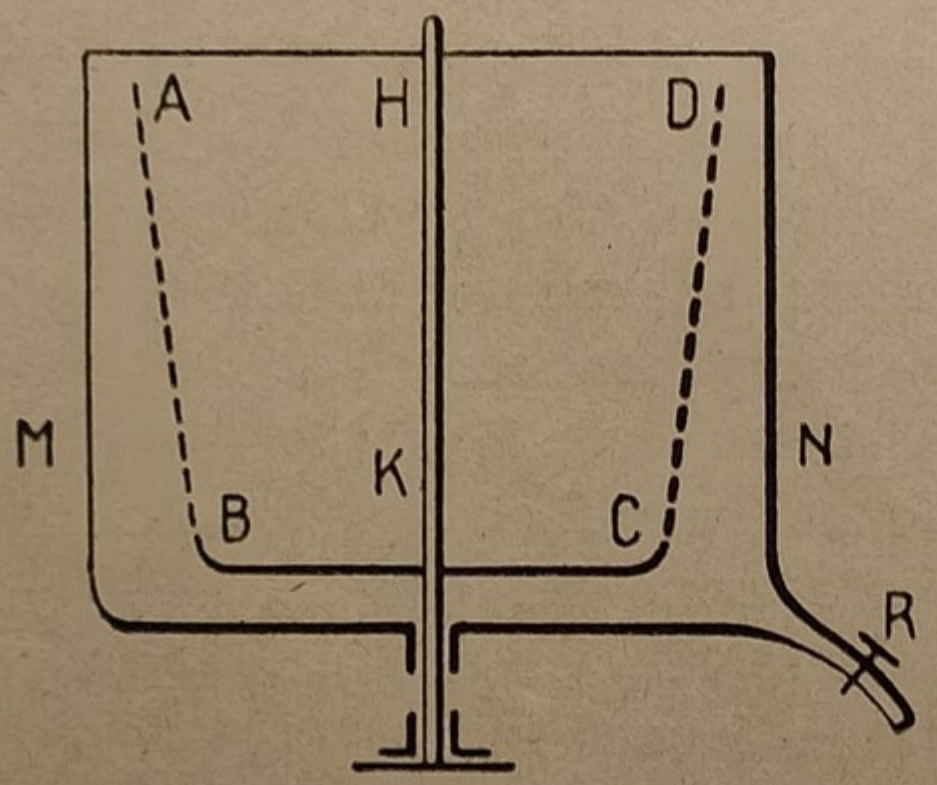

Fig. 104.

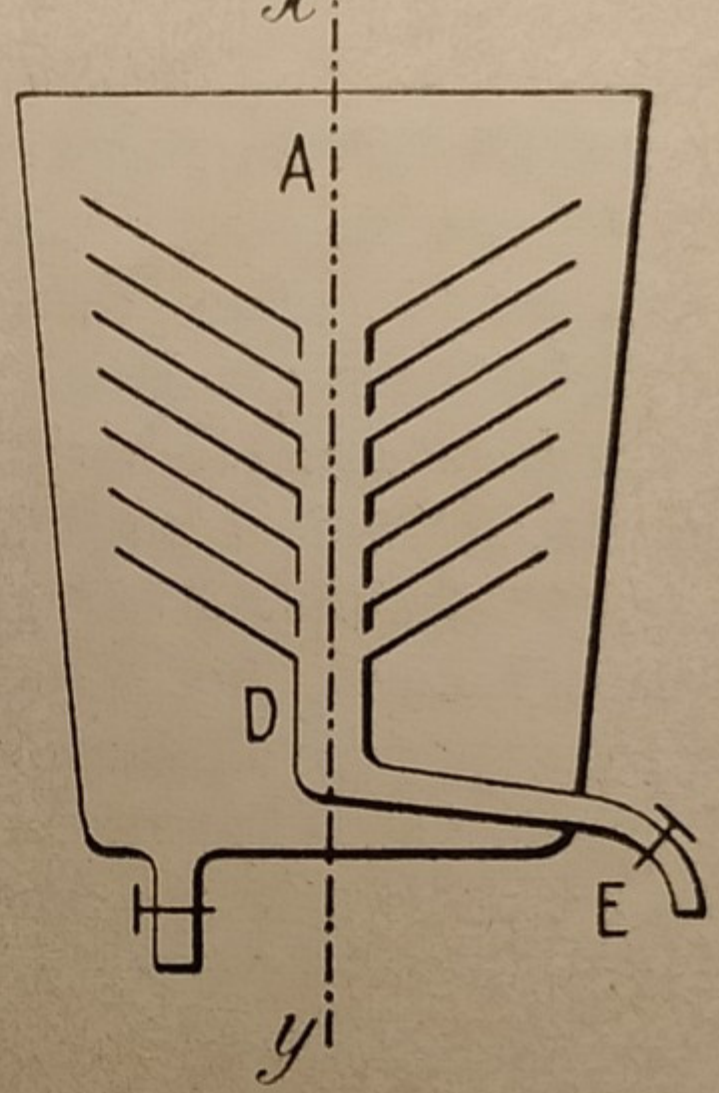

Fig. 105.

Nei caseifici la separazione della crema dal latte si eseguisce e con grande rapidità mediante le *scrematrici* centrifughe (fig. 105). Il latte vien messo in un recipiente A che porta fissa nell'interno una serie di imbuti sovrapposti, comunicanti verso il vertice con un tubo D che è coassiale coll'asse di rotazione xy dell'apparecchio. La crema avendo una densità 0,93, e il latte scremato 1,036, la forza centrifuga agisce sulla prima con minor intensità, talchè il latte è proiettato fuori dagli imbuti, mentre la crema si raccoglie verso l'asse e cola per il tubo DE.

I *ventilatori* a forza centrifuga (fig. 106) sono formati di un mulinello ad alette diritte o curve *a*, *a*... girante rapidamente nell'interno di un tamburo *A*. Da questo parte un tubo tangente *B*, mentre un tubo *C* è unito al centro di una delle basi del tamburo. Così avviene che mentre il mulinello ruota l'aria partecipa alla rotazione, e per effetto della forza centrifuga viene spinta verso la periferia del tamburo e costretta ad uscire per il tubo tangente, mentre in corrispondenza dell'asse si forma il vuoto, per cui l'aria esterna è richiamata nella scatola attraverso il tubo *C*.

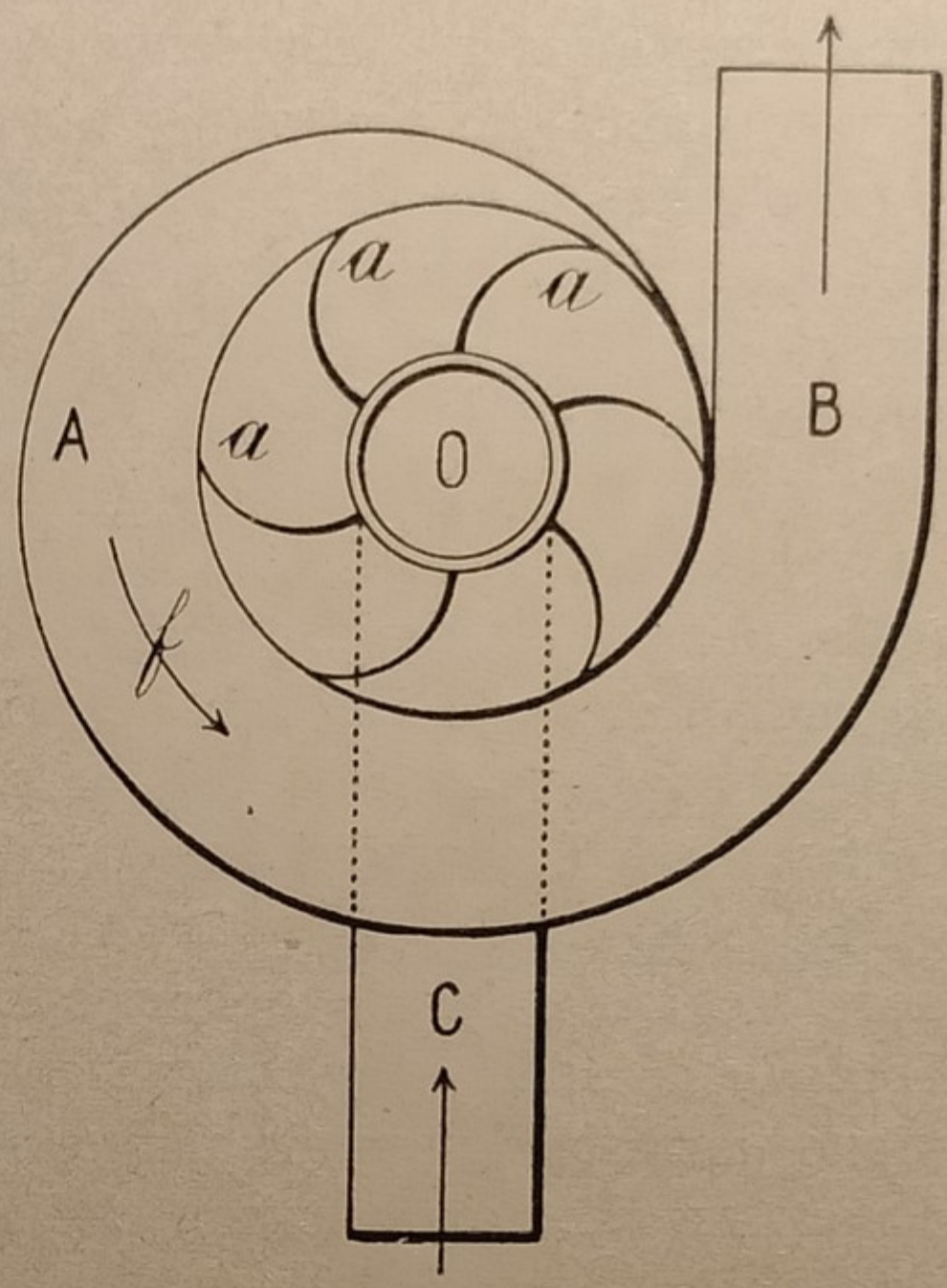

Fig. 106.

Se il foro assiale, anzichè comunicare coll'atmosfera è unito a un tubo che pesca nell'acqua, l'apparecchio diventa una *pompa centrifuga idraulica*.

Lavoro - Energia - Potenza.

27. Lavoro ed energia - Potenza. — Eseguire un lavoro significa impiegare una forza per ottenere un effetto utile, perciò si richiede in ogni caso che il corpo o il sistema di corpi, cui la forza è applicata, risulti in movimento.

Un uomo lavora quando trasporta un carico; un cavallo lavora trascinando un carretto sopra una strada; un motore elettrico applicato ad una pompa idraulica lavora mantenendo in moto la pompa per sollevare dell'acqua. In base a ciò,

per *definizione*, diremo che *viene eseguito un lavoro tutte le volte che una forza accompagna un corpo nel suo movimento.*

Il caso più semplice che si presenta, al quale con opportune considerazioni si possono ridurre tutti gli altri, è che il corpo in moto sia accompagnato da una forza costante e che lo spostamento del punto di applicazione della forza si effettui nella direzione della forza. In tal caso ammettiamo che il lavoro eseguito L sia misurato dal prodotto della forza F per lo spostamento s, cioè:

$$L = F \times s. \qquad (1)$$

La misura del lavoro fatta con tale criterio è giustificata da semplici considerazioni. Un impresario deve far trasportare da manovali della calce, dei mattoni, ecc., per una casa in costruzione: è ovvio che la tariffa concordata tra impresa e operai contempli e la quantità — peso — del materiale che deve venire sollevato e l'altezza a cui deve essere portato. Dimodochè se in una costruzione un certo peso di materiale viene portato al secondo piano, i manovali riceveranno per il lavoro eseguito una somma che sarà evidentemente doppia di quella che percepirebbero se lo stesso materiale dovesse essere portato solo al primo piano, come pure la somma percepita dovrà essere doppia se un peso doppio di materiale verrà trasportato alla stessa altezza. Ciò avviene perchè appunto il lavoro eseguito si stima proporzionale al peso dei corpi che vengono sollevati, cioè alla forza che li accompagna nel loro movimento e all'altezza cui vengono portati, che è lo spostamento del punto di applicazione della forza.

Energia è *l'attitudine di un corpo ad eseguire un lavoro.*

Potenza di un motore è *il lavoro che il motore è capace di eseguire in una unità di tempo.*

28. Lavoro motore e resistente. — Nella definizione di lavoro abbiamo ammesso che lo spostamento avvenisse nella direzione della forza senza precisarne il senso. Or nella pratica si riscontra che il più delle volte sul corpo agiscono più forze, che si possono ridurre a due, agenti nella direzione dello spostamento, ma in sensi opposti.

Ad esempio, quando mediante uno sforzo muscolare F solleviamo verticalmente un corpo pesante da G a G_1 (fig. 107), la forza muscolare F agisce nella direzione e nel senso del moto, e il peso del corpo P agisce nella direzione del moto, ma in senso opposto. La forza F si dice *forza motrice* o *potenza* e il peso P del corpo *forza resistente* o *resistenza*. Diremo allora che è la potenza che *eseguisce* il lavoro, o anche che la potenza *vince* la resistenza, e se s è lo spostamento del corpo, chiameremo il prodotto Fs lavoro *motore*, il prodotto Ps lavoro *resistente*.

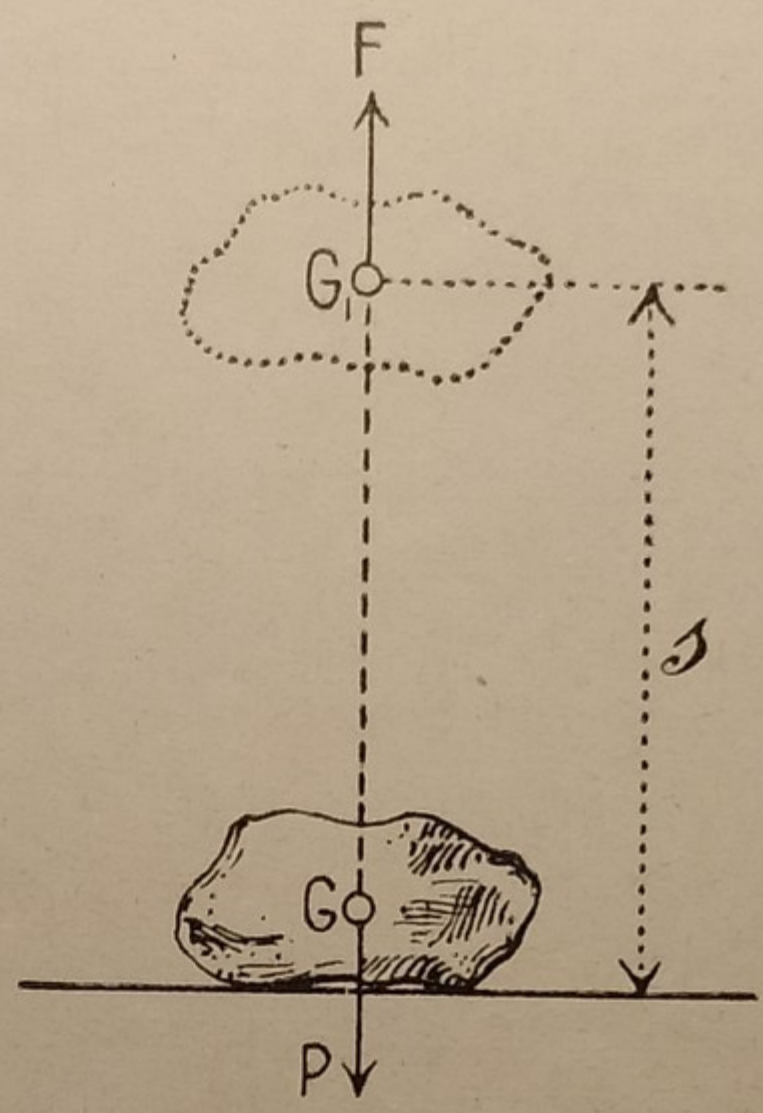

Fig. 107.

29. Lavoro d'una forza quando lo spostamento non avviene nella sua direzione. — In questo caso certamente sul corpo agiscono anche altre forze e lo spostamento avviene nella direzione e senso della *risultante di tutte*. Se riesciamo a determinare questa risultante, cadiamo nel caso fondamentale.

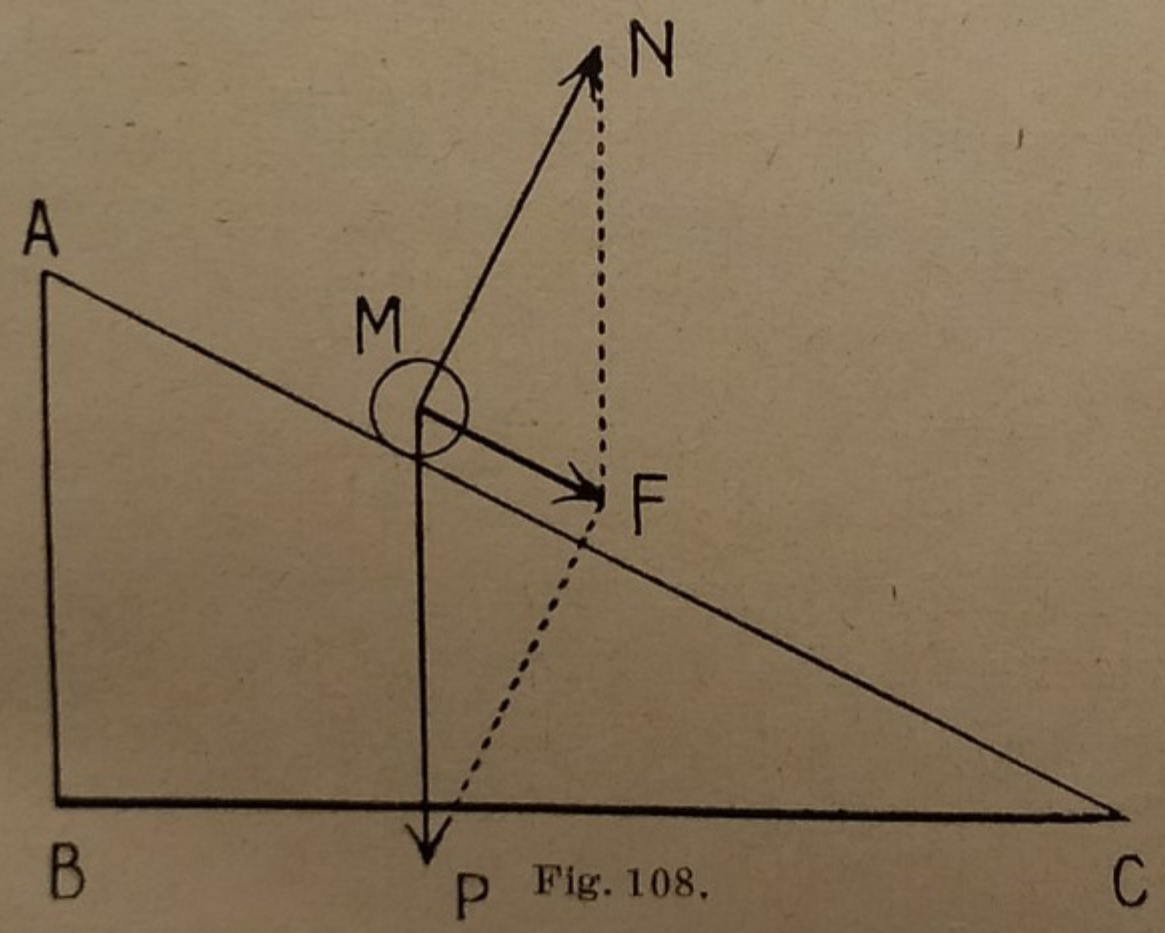

Fig. 108.

Consideriamo, ad esempio, un corpo M pesante abbandonato sopra un piano inclinato (fig. 108). Il corpo discende in direzione parallela alla lunghezza del piano. Esso è soggetto al suo peso P e ad una forza N perpendicolare al piano, destata in questo in seguito alla sua deformazione operata dalla pres-

sione che il corpo vi esercita. Come si desti nel piano la forza N verrà chiarito nello studio della elasticità (35).

La forza N però acquista una intensità tale che la F risultante di essa e della P sia parallela alla lunghezza del piano. Ora, se il corpo scende da A a C, il lavoro L eseguito dalla forza F è:

$$L = F \times AC.$$

Nella figura si osserva che i triangoli ABC, MFP sono simili, per cui si ha:

$$F : P = AB : AC$$

da cui:

$$F \times AC = P \times AB.$$

Ma $P \times AB$ rappresenta per definizione il lavoro eseguito dalla gravità nel caso che il corpo cada verticalmente da A in B, perciò si conclude che *nella discesa di un grave lungo un piano inclinato, la gravità eseguisce lo stesso lavoro che eseguisce quando il corpo cade verticalmente dalla stessa altezza.* La legge si può generalizzare per la discesa lungo una curva qualsivoglia.

Sicchè se il corpo di peso P scende comunque dall'altezza h, il lavoro L compiuto dalla gravità è sempre dato dalla formola:

$$L = Ph \,. \qquad (1)$$

D'altra parte, se con uno sforzo muscolare noi solleviamo *comunque* — sia verticalmente, sia obliquamente, sia anche servendoci di un apparecchio qualunque di sollevamento — il corpo alla stessa altezza, occorre compiere lo stesso lavoro Ph.

Ne consegue che per trasportare un corpo pesante orizzontalmente il lavoro richiesto è zero, poichè è zero l'altezza a cui il corpo vien sollevato.

Per mettere in moto un corpo giacente sopra un piano orizzontale occorre applicarvi una forza che gli comunicherà in un certo tempo una certa velocità. Se a questo punto la forza viene soppressa, il corpo continua il suo moto per inerzia con velocità costante. Ciò è vero però solo in teoria, poichè sul corpo in moto, oltre alla gravità, agiscono anche altre forze, quali l'attrito e la resistenza offerta dal fluido in cui il corpo si muove (33), forze che hanno l'effetto di diminuirne gradualmente la velocità e di riportarlo in quiete.

30. Unità di lavoro e di potenza. — Dalla formola (1) del paragrafo 27 possiamo stabilire una *unità* per la misura del lavoro; basta fare in tal formola $F = 1$ e $s = 1$; essa diviene allora $L = 1$; vale a dire il lavoro eseguito ha il valore *uno* se la forza che accompagna il corpo è *uno*, e lo spostamento nella sua direzione è *uno*. Cosicchè se per unità di forza prendiamo il *chilogrammo* e per unità di spostamento il *metro*, il lavoro *uno* è quello che *corrisponde ad una forza costante di un chilogrammo, mentre il suo punto di applicazione percorre, nella direzione della forza, lo spazio di un metro.* Tale unità di lavoro vien chiamata *chilogrammetro* (kgm).

Se invece si adotta come unità di forza la *dina* e di spazio il *centimetro*, l'unità di lavoro è detta *erg* o *ergon.*

Ricordando (18) che:

$$1 \text{ kg} = 980.000 \text{ dine circa}$$

e che:

$$1 \text{ m} = 100 \text{ cm}$$

1 kgm è il lavoro nel quale sono impegnate 980.000 dine per uno spostamento di 100 cm, quindi:

$$1 \text{ kgm} = 980.000 \times 100 = 98.000.000 \text{ di erg circa}$$

od anche:

$$1 \text{ kgm} = 9{,}8 \times 10^7 \text{ erg circa.}$$

Da queste considerazioni apparisce che l'erg è unità troppo

piccola per le misure comuni, quindi nella pratica si adotta il *joule* che per *definizione* vale 10^7 erg. In tal maniera:

$$1 \text{ kgm} = 9{,}8 \text{ joule circa.}$$

E per conseguenza si può facilmente stabilire una *unità* per la *misura* della *potenza* di un motore. Potremo cioè prendere come unità la potenza capace di eseguire il lavoro di 1 kgm, di 1 erg o di 1 joule al secondo.

L'unità usuale è però il *cavallo-vapore* — HP da *Horse Power* = cavallo forza — che è la potenza capace di eseguire il lavoro di 75 chilogrammetri al secondo.

Essendo però l'HP una grandezza variabile, perchè varia il kg. da cui esso dipende, i Fisici hanno convenuto di adottare come unità di potenza il *watt*, la potenza cioè capace di eseguire il lavoro di un joule al secondo.

Ricordando la relazione tra il kgm. e il joule, ritenendo $g = 980^{cm}$, si ha:

$$1\ HP = 75 \times 9{,}8 = 735 \text{ joule al secondo}$$

cioè:

$$1\ HP = 735 \text{ watt.}$$

Nella pratica si usano più frequentemente l'*ettowatt* e il *kilowatt*, che meglio si adattano alle comuni misure.

E perchè non avvengano equivoci, notisi che il *wattora*, frequentemente usato in Elettrotecnica, è unità di *lavoro* e non di potenza; è il lavoro che la potenza di 1 watt può eseguire in un'ora, ossia in 3600 secondi. E poichè per definizione 1 watt è la potenza capace di eseguire il lavoro di un joule al secondo,

$$1 \text{ wattora} = 3600 \text{ joule.}$$

L'*ettowattora* e il *kilowattora* sono multipli del wattora di significato ben chiaro.

31. Energia di moto e di posizione. — In base alla data definizione di energia (27) è evidente che un corpo in moto possiede

dell'energia; la si chiama *energia di moto*, e anche *energia cinetica*. Ma può avere dell'energia anche un corpo in quiete in grazia del suo *stato attuale*, con la qual denominazione intendiamo una posizione del corpo nello spazio, una certa forma, o infine un certo stato fisico o chimico. Dunque un corpo pesante portato sul tetto di una casa, ha dell'attitudine a compiere un lavoro che non aveva quando era sul piano della strada; una molla in tensione ha pure una tale attitudine che non ha nella forma normale. Questi corpi hanno, come si dice, dell'*energia potenziale*.

Notisi che tanto energia cinetica quanto energia potenziale si possono avere anche nel caso in cui i corpi in questione hanno masse infinitesimali; così si ammette che il calore dei corpi sia una forma di energia cinetica dovuta al movimento di piccolissime particelle; è una forma di energia cinetica anche la corrente elettrica. Invece hanno dell'energia potenziale il sistema chimico carbonio-ossigeno, idrogeno-ossigeno, una carica di polvere pirica, una bottiglia di Leyda carica, un accumulatore carico, ecc.

Queste forme di energia possedute da masse infinitesimali — molecole, atomi, subatomi — si comprendono sotto il nome di *energia invisibile*.

L'energia cinetica è detta anche *forza viva* per il fatto che un corpo in moto è capace di compiere un lavoro, come fosse un corpo vivente, a spese della velocità posseduta.

Esempi di corpi in moto che eseguiscono un lavoro a spese della loro velocità, sono frequentissimi, anzi si può affermare che qualunque lavoro è prodotto da un corpo in movimento. Così un pendolo oscillando oltrepassa la posizione di riposo per inerzia e sale dalla parte opposta compiendo un lavoro per sollevare il proprio peso ad una certa altezza, ma lo compie a spese della sua velocità che va diminuendo; un proiettile che colpisce un ostacolo può penetrarvi ed eseguisce un lavoro nel vincere la coesione molecolare del corpo.

Un importante teorema di Meccanica, che non dimostreremo, dice che: *il lavoro che può eseguire un corpo in moto ritornando in quiete, è eguale al lavoro che s'è dovuto spendere per imprimergli la primitiva velocità.*

Tale lavoro L rimane immagazzinato, per così dire, nel corpo finchè esso conserva la sua velocità, ed è misurato dal *semiprodotto della massa del corpo per il quadrato della velocità.*

Di modo che la forza viva ossia l'energia cinetica E_c posseduta da un corpo in moto è espressa dalla formola:

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2$$

dove m è la massa del corpo e v la velocità.

A costituire l'energia cinetica di un corpo la massima importanza compete alla velocità, dimodoche i corpi che possiedono masse anche piccole, ma sono animati da grandi velocità, possiedono una quantità rilevantissima di energia. Tali sono i proiettili lanciati dalle armi da fuoco con velocità che possono superare i mille metri al secondo; ciò spiega i grandi effetti distruttivi che producono.

Grandiosi effetti di distruzione sono anche prodotti dai moderni esplosivi, che pur essendo racchiusi in involucri di piccola resistenza, come le bombe, in grazia della enorme velocità da cui sono animate le molecole dei gas che si sviluppano in seguito alla violenta decomposizione dell'esplosivo, determinano nell'aria circostante uno spostamento così intenso da dar luogo ad effetti di distruzione straordinari.

Fra le innumerevoli applicazioni della forza viva posseduta da un corpo in moto, accenniamo l'uso del comune martello per piantar chiodi; in questo caso, al momento dell'urto, sulla testa del chiodo si esercita una forza di parecchie centinaia di chilogrammi. Nello stesso modo si spiega l'uso della *berta* o battipali, che serve per piantare nei terreni poco resistenti o paludosi, i pali per le palafitte.

Anche l'energia potenziale si può in certi casi calcolare con facilità; l'energia potenziale E_p posseduta da un corpo che pesa P^{kg} e si trova ad una altezza di h^{m}, viene misurata evidentemente dal lavoro che si è dovuto spendere per portare il corpo a tale altezza, ed è calcolabile quindi colla formola (1) del § 29, è cioè:

$$E_p = Ph^{kgm},$$

la quale è di grandissima importanza per la valutazione dell'energia dovuta alle cadute d'acqua, che vengono oggi largamente utilizzate.

32. Equilibrio dinamico nelle macchine. — In qualunque macchina operatrice agiscono contemporaneamente delle forze *motrici*, che tendono ad aumentare la velocità e delle forze *resistenti*, che tendono a diminuirla. Ora se si calcolano i rispettivi lavori, *motore* e *resistente* (28), eseguiti in un certo tempo t, si riscontra che la differenza dei due lavori è eguale alla variazione della forza viva subìta dal sistema in quel tempo.

Di guisa che se L_m e L_r indicano i lavori motore e resistente, e il sistema, considerato ridotto a un'unica massa m, ha al principio e alla fine del tempo considerato le velocità v_t e v_o rispettivamente, si ha:

$$L_m - L_r = \frac{mv_t^2}{2} - \frac{mv_o^2}{2} .$$

Per cui, se è $L_m > L_r$, è anche $v_t > v_o$, cioè la macchina assume un moto accelerato, e il contrario avviene se è $L_m < L_r$. Se la macchina è in moto uniforme, o, come si dice anche, in *equilibrio dinamico*, essendo in tal caso $v_t = v_o$, dovrà essere anche $L_m = L_r$.

Ma il lavoro resistente è sempre la somma di due lavori: del lavoro *utile* e del lavoro *passivo* o *perduto*. Il primo è il lavoro ad eseguire il quale è destinata la macchina: ad esempio, in una pompa destinata a sollevare dell'acqua il lavoro utile è misurato dal prodotto del peso dell'acqua sollevata per l'altezza raggiunta. Il lavoro passivo è quello eseguito per vincere gli attriti e la resistenza del mezzo (33).

Considerate così le cose, quando la macchina è in equilibrio dinamico, si ha, indicando con L_u e L_p i lavori utile e perduto:

$$L_m = L_u + L_p .$$

La quale dimostra che il lavoro utile L_u è *sempre* minore del lavoro motore. Ciò porta all'assurdità del *moto perpetuo*, per realizzare il quale occorrerebbe che si verificasse invece il fatto contrario, cioè che fosse $L_u > L_m$.

Notiamo poi che il *rendimento* E di una macchina è il rapporto fra il lavoro utile e il lavoro motore; si ha cioè:

$$E = \frac{L_u}{L_m} .$$

33. Resistenze passive. — Si chiamano con questo nome le forze, sempre presenti in una macchina, che tendono a diminuirne la velocità e il cui lavoro abbiamo poco prima chiamato passivo o perduto. Tali sono l'*attrito* e la *resistenza del mezzo*.

Si dice *forza di attrito* o semplicemente *attrito* la forza resistente che un corpo trova sempre quando si muove a contatto di un altro. L'attrito *statico* è misurato dalla forza minima necessaria a iniziare lo spostamento relativo dei due corpi; l'attrito *dinamico* dalla forza necessaria per mantenere costante la velocità durante il moto; e l'esperienza prova che l'attrito statico, a parità di altre condizioni, è maggiore di quello dinamico, perciò lo sforzo richiesto nella messa in moto — sforzo di *smarramento* o di *avviamento* — è maggiore dell'attrito dinamico e lo supera di circa 2 quinti.

L'attrito si distingue in *radente*, che si ha quando i due corpi strisciano l'uno contro l'altro, come avviene, ad esempio, nelle slitte, e *volvente*, quando la superficie del corpo in moto si sviluppa sull'altro, com'è delle ruote di un veicolo che rotolano sulla strada. A parità di condizioni l'attrito radente è sempre maggiore di quello volvente, ed è per questo che i veicoli a ruote sono quasi universalmente usati.

L'attrito cresce col crescere della pressione che un corpo esercita sull'altro ed è sensibilmente costante a tutte le velocità.

Si chiama *coefficiente d'attrito* il valore dell'attrito per un carico unitario. Il coefficiente di attrito sulle strade ordinarie è $^{35}/_{1000}$, ciò significa che per mantenere in moto uniforme sopra una strada ordinaria orizzontale un veicolo che pesa 1000 kg., si deve applicargli, in direzione orizzontale, una forza di 35 kg.

In molti casi pratici gli sforzi dei tecnici sono diretti a diminuire gli attriti, quindi l'uso delle strade ferrate, per le quali il coefficiente di attrito non arriva a $^{5}/_{1000}$; l'abbondante

lubrificazione degli assi dei veicoli; l'uso dei *cuscinetti a sfere*, ecc.

In certi altri casi si utilizza l'attrito; così avviene nei freni, che sono blocchi, detti *ceppi*, di forma conveniente, che possono essere portati a strisciare con forza contro la periferia delle ruote, allo scopo di moderare o di arrestare la corsa del veicolo.

La *resistenza del mezzo* è la resistenza opposta al moto di un corpo dal fluido in cui si muove; tale fluido è comunemente l'aria.

La questione è diventata in questi ultimi tempi estremamente importante, avuto riguardo al moto dei proiettili e alla navigazione aerea, ma le leggi che regolano la resistenza del mezzo sono piuttosto complesse e le numerose determinazioni fatte non hanno dato sempre risultati molto concordanti.

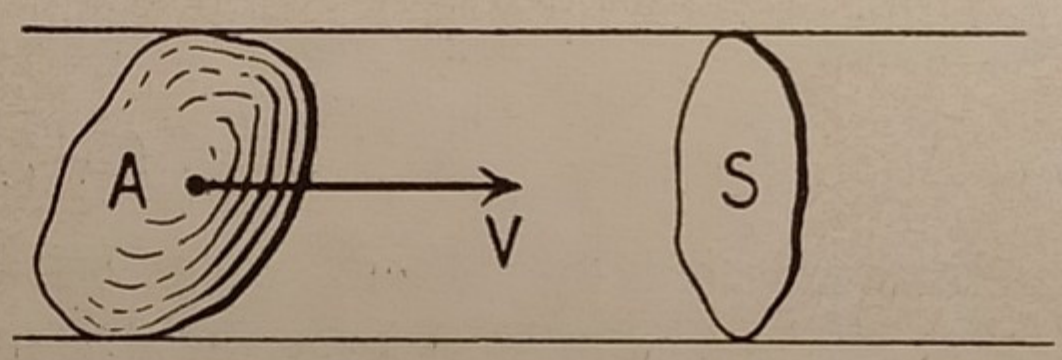

Fig. 109.

Si consideri un corpo A (fig. 109), animato da velocità V e sia S la sezione retta del cilindro, le cui generatrici son parallele a V e tangenti al corpo. La resistenza dell'aria, che indicheremo con R, dipende:

1° *dalla densità del mezzo ed è proporzionale a tal densità;*

2° *dalla velocità V e cresce con questa;*

3° *dalla superficie* S, *ed è sensibilmente proporzionale alla stessa;*

4° *dalla forma del corpo.*

Riguardo alla velocità si riscontra che per velocità molto piccole, dell'ordine di qualche centimetro al secondo, *la resistenza dell'aria è proporzionale alla velocità*. Ma per velocità un po' grandi, inferiori od eguali a 100 metri al secondo, R è sensibilmente *proporzionale al quadrato della velocità*, e per velocità superiori a 100 metri al secondo, e questo è il caso dei proiettili, R cresce *più rapidamente del quadrato della velocità*.

Avuto riguardo a tali leggi e specialmente alla velocità, si comprende che la caduta di un corpo nell'aria non può effettuarsi con moto uniformemente accelerato; dapprincipio il moto sarà accelerato, ma la resistenza dell'aria che cresce colla velocità di caduta, se il corpo cade da un'altezza sufficiente, ben presto viene ad eguagliare il peso del corpo; da quell'istante in poi il corpo si muove per inerzia con velocità costante.

Tale velocità è però variabile a seconda di diverse circostanze, e l'esperienza ha fatto scoprire diverse formole empiriche che si adattano ai diversi casi, ma di tali formole non possiamo trattare; diremo solo che la velocità costante v che può assumere cadendo nell'aria una sfera è data dalla formola:

$$v = 7{,}03\sqrt{rp}$$

nella quale v è la velocità in metri al secondo, r il raggio della sfera in metri, e p il peso in grammi di un centimetro cubo della sostanza di cui è formata.

La detta formola ci dà la ragione per cui certi corpi minutissimi, quali son quelli che formano il pulviscolo atmosferico e le piccolissime masse d'acqua costituenti la nebbia e le nubi, possono rimanere lunghissimo tempo in sospensione nell'aria, avendo in tali casi r valori estremamente piccoli.

A calcoli fatti le goccioline d'acqua formanti la nebbia e le nubi, aventi un diametro medio di $^2/_{100}$ di millimetro, scendono con una velocità limite di 30 millimetri circa al secondo.

34. Proprietà principali dei solidi; tenacità, durezza. — I solidi, corpi nei quali la coesione molecolare è assai grande, possono per azione di forze esterne essere deformati e anche divisi in parti. Nella tecnica interessa fra l'altro di conoscere il *limite di rottura* di una sostanza, cioè il minimo peso che agendo per trazione è sufficiente a rompere un filo avente la sezione di 1 mm^2. Il limite di rottura misura la così detta *tenacità* dei corpi. Ad esempio, si è trovato che il limite di rottura del ferro è di circa 33, per l'acciaio può salire anche a 90.

La *durezza*, che non va confusa colla *tenacità*, è la resistenza opposta dai corpi alla scalfitura e può essere, come nel dia-

mante, accompagnata dalla *fragilità*, per cui taluni corpi si frammentano sotto l'azione di piccole forze deformatrici.

Altre proprietà importanti sono la *duttilità* cioè la proprietà dei corpi di lasciarsi tirare in fili colla filiera; il più duttile dei metalli è il platino, col quale si sono potuti ottenere dei fili di pochi micron di diametro.

Si chiamano *malleabili* quei corpi che si lasciano ridurre col martello o col laminatoio in lamine. Così l'oro è dei metalli il più malleabile, essendosene ottenute delle foglie dello spessore di $\frac{1}{50}$ di micron.

Molti corpi infine, sotto l'azione di forze di piccola intensità ma di lunga durata, presentano delle forti deformazioni; un bastone di ceralacca, che è abbastanza fragile, si piega notevolmente se è tenuto per molto tempo poggiato sulle estremità. Dei pezzi di pece gettati alla rinfusa in una botte, finiscono per saldarsi insieme in un'unica massa, che presenta una superficie libera piana e orizzontale, come i liquidi, e se ci son dei fori nella botte la pece può colarvi a lentissime gocce.

Anche i metalli sottoposti a fortissime pressioni presentano un simile comportamento; ciò attesta la continuità fra lo stato solido e lo stato liquido. Anche la temperatura oltre la pressione ha nel fenomeno una parte importante.

35. Elasticità; isterèsi elastica. — Qualunque corpo, assoggettato a forze agenti su tutti i punti della sua superficie, subisce una diminuzione di volume e al cessare delle forze il corpo *tende* a riprendere il volume primitivo. Qualche corpo, come il caoutchouc, lo riprende esattamente; in altri rimane una diminuzione più o meno accentuata di volume. Questa tendenza del corpo a riprendere lo stato primitivo lo attribuiamo ad una reazione delle molecole, che chiamiamo *elasticità*. Nel caso considerato abbiamo in particolare l'*elasticità di volume*.

I corpi solidi possono, poi, per effetto di forze esterne, cambiare di *forma*, e anche in questo caso al cessare delle forze si manifesta nei corpi una tendenza a riprendere la forma primitiva; abbiamo in questo caso l'*elasticità di forma*.

La deformazione di un corpo solido può avvenire in quattro maniere diverse, per *trazione*, per *compressione*, per *flessione*, per *torsione*.

La *trazione* si studia sospendendo un filo verticalmente all'estremo superiore, e applicando all'altro estremo dei pesi. *L'allungamento che ne deriva è molto approssimativamente proporzionale alla lunghezza primitiva del filo, al peso traente e inversamente proporzionale alla sezione.*

La *compressione* si può studiare caricando dei pesi sopra la faccia superiore di un prisma o di un cilindro poggiato sopra un piano resistente e si riscontra anche in questo caso che la diminuzione di altezza subìta dal corpo riesce proporzionale al peso che lo preme.

Nel caso della trazione chiamasi *coefficiente di allungamento* l'aumento di lunghezza subìto da ciascun centimetro di un filo di 1 mm² di sezione tirato dal peso di 1 kg. Detto k tale coefficiente, e indicando con L la lunghezza del filo soggetto al peso traente P e con s la sezione, l'allungamento l subìto dal corpo, per la legge sopra enunciata è evidentemente espresso da:

$$l = k\frac{LP}{s} \ .$$

L'inverso di k, cioè $\frac{1}{k}$, chiamasi *modulo di trazione* della sostanza di cui il corpo è costituito. Così il rame ha un modulo di trazione di 10.000, cioè un coefficiente di allungamento di $\frac{1}{10.000}$; significa che un filo di rame della sezione di 1 mm² si allunga, sotto l'azione di un peso traente di 1 kg., di $\frac{1}{10.000}$ di centimetro per ogni centimetro della sua lunghezza iniziale.

La *flessione* si può studiare col processo indicato dalla fig. 110; la sbarra AB è fissata con l'estremo A, e all'estremo B si attacca un piattello, come quelli d'una bilancia, per potervi caricare dei pesi a volontà. Di fronte all'estremo libero è fissato un regolo millimetrato HR per misurare la *flessione* subìta dall'asta, cioè lo spostamento dell'estremo libero. Si riscontra, che, almeno per carichi non superanti un certo limite, la flessione è sempre *proporzionale al peso flettente*. Se poi si variano

le dimensioni della sbarra, si rileva che *la flessione è proporzionale al cubo della lunghezza; è inversamente proporzionale alla larghezza ed al cubo dello spessore:* ciò nell'ipotesi che la sezione

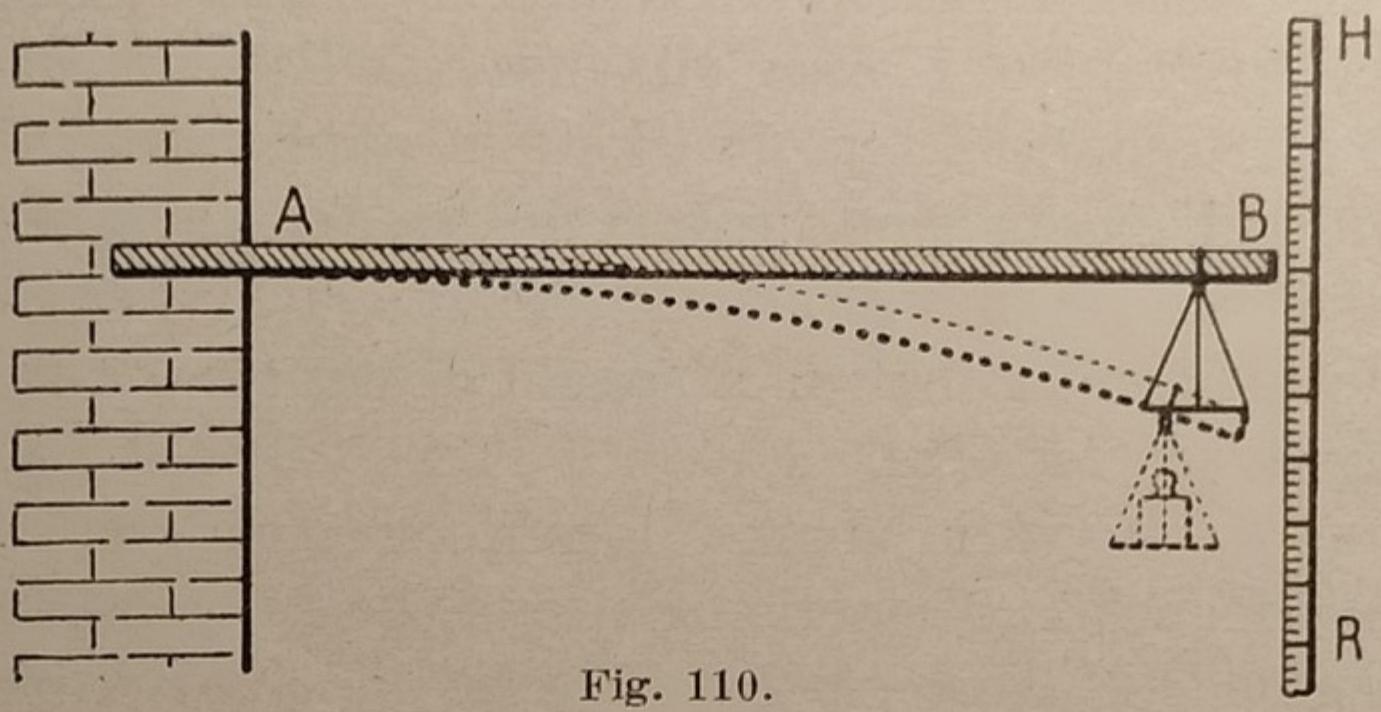

Fig. 110.

trasversa della sbarra sia un rettangolo del quale il lato orizzontale costituisce la larghezza e quello verticale lo spessore.

Le leggi anzidette possono esprimersi con la formola:

$$f = k \frac{pl^3}{ab^3} ,$$

nella quale f è la flessione, p il peso flettente, l la lunghezza, a la larghezza e b lo spessore.

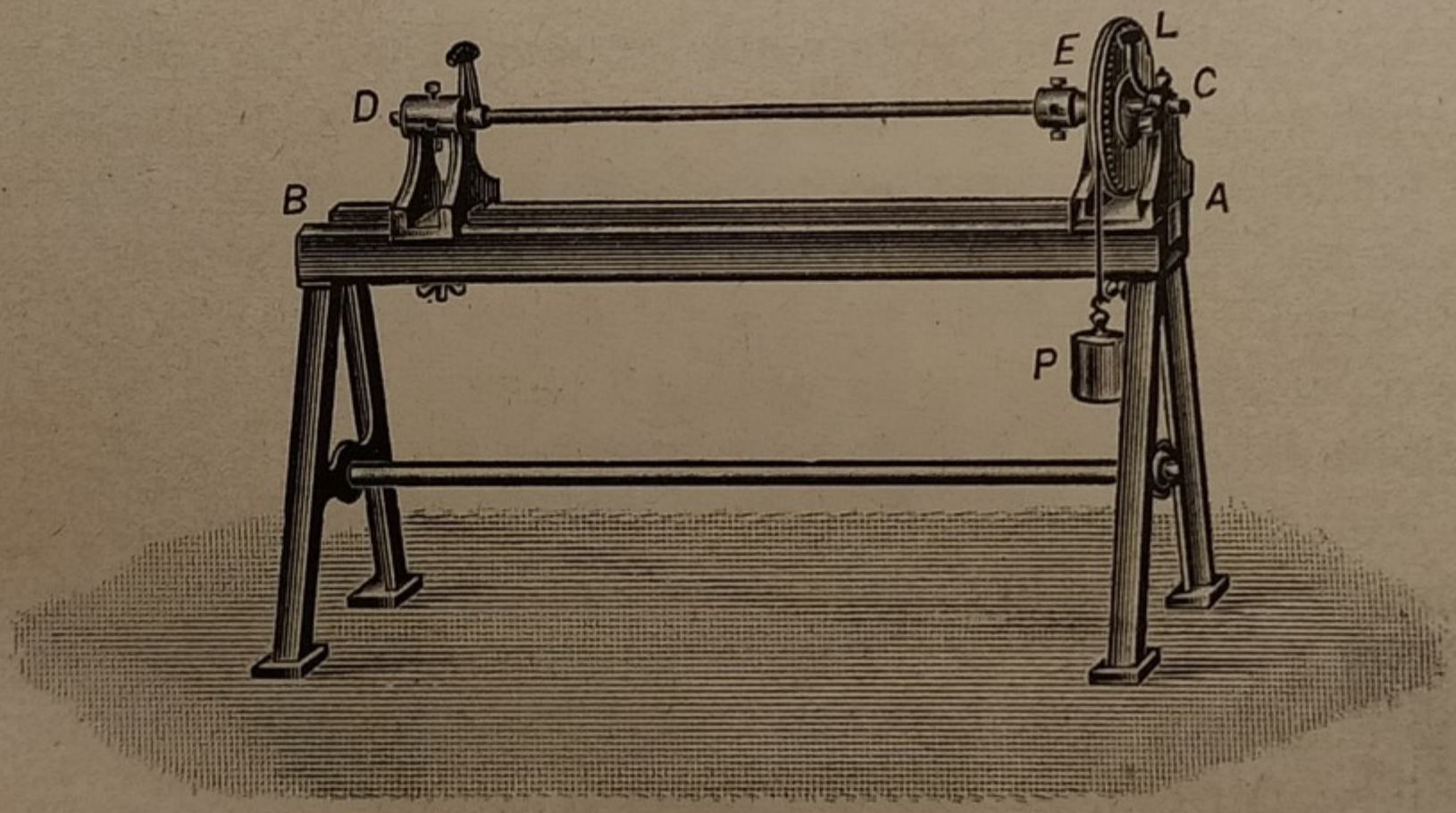

Fig. 111.

Per lo studio della elasticità di torsione può servire l'apparecchio della figura 111. La sbarra da sottoporre alla prova

è fissata con un estremo in un manicotto D mentre l'altra estremità è libera di girare e porta una ruota scanalata E sulla gola della quale passa una fune caricata di un peso P. Il momento di questa forza provoca nell'asta una torsione che è misurata dall'indice L fisso alla base dell'apparecchio, il cui estremo corrisponde a una divisione in gradi fatta sulla ruota. In tal modo la ruota gira di un certo angolo finchè il momento del peso P sia equilibrato dal momento delle forze elastiche che si destano nella sbarra. L'angolo di cui gira la ruota chiamasi *angolo di torsione.*

Operando con varie sbarre di sezione circolare, di diversa natura e dimensioni, l'esperienza prova che *l'angolo di torsione* ω *è proporzionale al momento* Pr *del peso, essendo* r *il raggio della ruota; è proporzionale alla lunghezza* L *della sbarra ed è inversamente proporzionale alla quarta potenza del raggio* R *della sbarra.* La legge si può esprimere colla formola:

$$\omega = k \frac{PrL}{R^4} .$$

Riassumendo, si vede dunque che per le diverse specie di elasticità la *deformazione* — allungamento, compressione, flessione e angolo di torsione — è *proporzionale alla forza deformatrice.*

Fin qui abbiamo tacitamente supposto che le azioni deformatrici non avessero lunga durata; che se esse si protraggono per molto tempo, i fenomeni risultano più complicati. Particolarmente avviene che, verificatasi la prima deformazione, questa continua ad aumentare nel tempo successivo via via più lentamente; il processo può durare settimane e mesi. Indi, se cessa l'azione della forza, la deformazione scompare in massima parte, ma non interamente; la deformazione diminuisce in seguito lentamente e scompare del tutto dopo un tempo eguale a quello che nella prima fase del fenomeno aveva durato l'azione della forza. Tale è il fenomeno che vien detto di *elasticità susseguente* o più modernamente *isterèsi elastica.*

Va infine notato che le leggi sopra enunciate valgono limitatamente nel caso che le intensità delle forze deformatrici non oltrepassino certi limiti oltre i quali il corpo rimane permanentemente deformato.

Meccanica dei liquidi.

36. Proprietà principali dei liquidi - Pressione. — I *fluidi* sono corpi le cui particelle, essendo dotate di piccola coesione, *si spostano facilmente le une rispetto alle altre.* Essi prendono la forma del vaso che li contiene, e sono corpi perfettamente elastici, cioè diminuiscono di volume quando si comprimono, ma riprendono il volume primitivo al cessare della pressione.

I fluidi si distinguono in *liquidi* e *gas* o *aeriformi.* I primi sono assai poco compressibili, e posti in un vaso sono limitati da una superficie libera. I gas sono al contrario assai compressibili e occupano sempre tutto il volume del recipiente che li contiene.

Un liquido invece posto in un recipiente vi si raccoglie sul fondo e se è in riposo ed è soggetto alla sola gravità, presenta una superficie libera *in ogni punto orizzontale.* Tale orizzontalità è conseguenza del peso del liquido e della scorrevolezza delle sue particelle; infatti sulla superficie libera non possono trovarsi particelle più alte e particelle più basse, se il liquido è in riposo; chè, se ciò fosse, le particelle più alte scorrerebbero nei punti più bassi. Così si comprende che tutte le particelle della superficie libera devono trovarsi alla stessa *altezza*, ossia tutte egualmente distanti dal centro della Terra, vale a dire *la superficie libera di un liquido in riposo soggetto alla sola gravità deve essere in ogni punto orizzontale.* Quindi se il vaso ha dimensioni ordinarie, la superficie libera è un piano orizzontale (fig. 112). Se la superficie libera ha dimensioni assai grandi, come è il caso

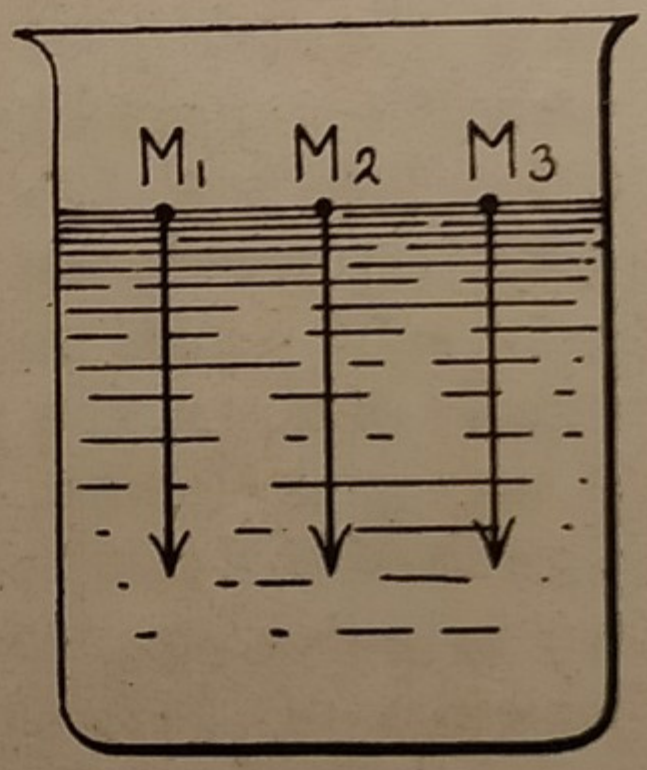

Fig. 112.

di un largo tratto di lago o di mare, essa ha la forma di calotta sferica (fig. 113). Che se poi il liquido è soggetto anche ad altre forze oltre quella di gravità, la condizione per l'equilibrio è che *la risultante delle forze agenti su ogni molecola della superficie deve essere normale alla superficie nel punto considerato*, perchè in tal caso la forza in questione preme la molecola considerata contro il liquido, ed è perciò equilibrata dalla resistenza del liquido stesso.

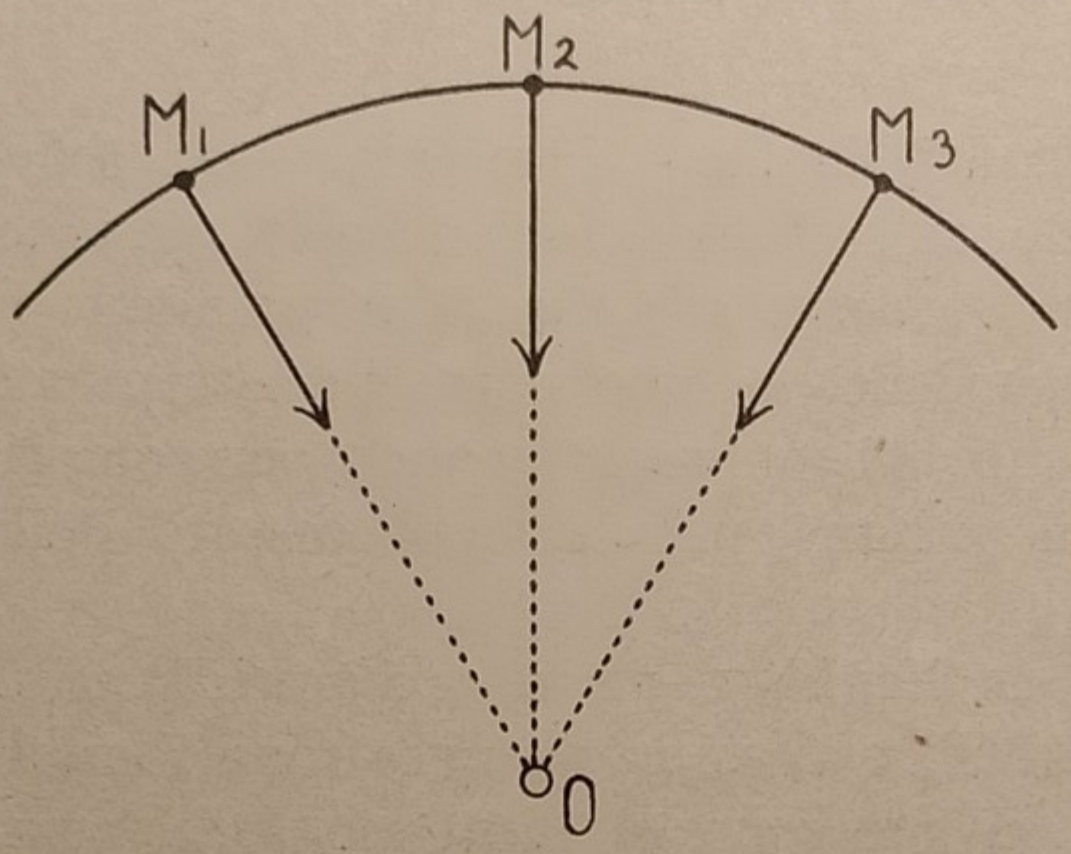

Fig. 113.

Per dimostrarlo, si mette dell'acqua in un recipiente di vetro (fig. 114), il quale si può adattare alla macchina della forza centrifuga (25). Quando il vaso ruota con velocità costante, si vedrà la superficie libera diventare concava, col punto infimo sull'asse di rotazione. Il calcolo dimostra che in tal caso la superficie libera *AOB* è un paraboloide di rivoluzione. A ciò si arriva considerando che una molecola *M* della superficie è soggetta alla forza di gravità *MP* verticale, e alla forza centrifuga *MF* orizzontale e diretta verso l'esterno. La risultante *R* di tali forze è evidentemente diretta in basso verso l'esterno, cosicchè per l'equilibrio la superficie libera deve in *M* disporsi normale alla *MR*. Il principio sopraccennato spiega anche il fenomeno della marea.

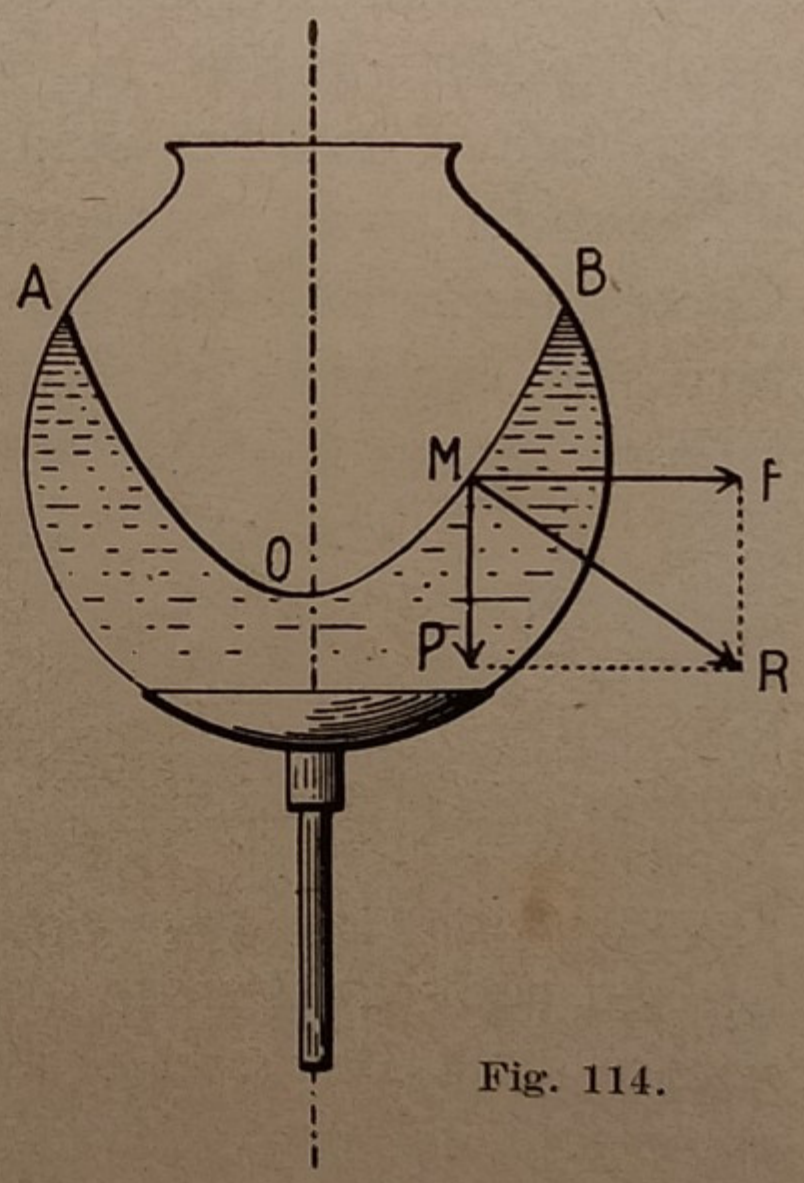

Fig. 114.

A questo punto occorre precisare una grandezza, la cui importanza ricorre spesso nei fenomeni dei liquidi e dei gas, la *pressione*. Quando, ad esempio, si applica una forza sullo stantuffo di una pompa da bicicletta, l'effetto prodotto non dipende soltanto dal valore della forza, ma anche dall'area di base dello stantuffo; l'effetto dipende dal valore *della forza che agisce sopra un centimetro quadrato* della base. Ognuno infatti sa che ci vuol meno forza per gonfiare i pneumatici di una bicicletta con una pompa di piccola sezione. Si è convenuto di chiamare *pressione* il rapporto fra la forza premente F e l'area premuta S; indicandola con P, per definizione, abbiamo:

$$P = \frac{F}{S} .$$

L'unità di pressione potrà quindi essere il *chilogrammo*, il *grammo* o la *dina* per *centimetro quadrato* (52).

Il concetto di pressione può estendersi anche fuori del campo dei fluidi: un solido pesante che poggia sopra una superficie piana, esercita su questa una *pressione*, misurata nello stesso modo. Così le statue molto pesanti poggiano sul terreno mediante una larga base; se si cammina sulla neve non ghiacciata con le scarpe comuni, i nostri piedi si affondano, perchè il peso del nostro corpo viene distribuito sopra una base ristretta, ma s'affondano assai meno usando le racchette o gli sky, nel qual caso la pressione esercitata dal nostro corpo risulta assai minore.

Tornando ai liquidi, occorre sapere che per molto tempo questi corpi vennero ritenuti come incompressibili; ciò dipese dal fatto che in realtà essendo pochissimo compressibili, sottoponendoli a pressione, la capacità del recipiente aumenta in misura così grande da mascherare la compressibilità.

Dopo numerosi tentativi infruttuosi iniziati dagli Accademici del Cimento nel secolo XVII, il Fisico danese Oersted nel 1820 fece conoscere il *piezometro*, col quale si può indubbiamente provare e anche misurare, se occorre, la comprimibilità dei liquidi.

Un modello di piezometro, che non è veramente della forma di quello originario di Oersted, è rappresentato nella

figura 115. Esso è formato di una bolla di vetro A contenente il liquido da esaminare, chiusa dentro a un recipiente più grande B pieno d'acqua e comunicante con il cannello sottile G. La bolla A comunica anche con un cannello C che ha la stessa sezione del cannello G. Unendo il cannello C con una pompa ad aria (53) si esercita una pressione sul liquido della bolla e si osserva che il liquido scende nel cannello. Ma pel contemporaneo aumento di capacità del recipiente A, una certa quantità di acqua del recipiente B viene sollevata nel cannello G; però l'abbassamento in C è maggiore dell'innalzamento in G. Ciò prova che il liquido di A ha veramente subìto una diminuzione di volume, misurata dalla differenza degli spostamenti nei due cannelli. Il liquido riprende nel cannello C esattamente la posizione di prima al cessare della pressione, dimostrandosi perfettamente elastico.

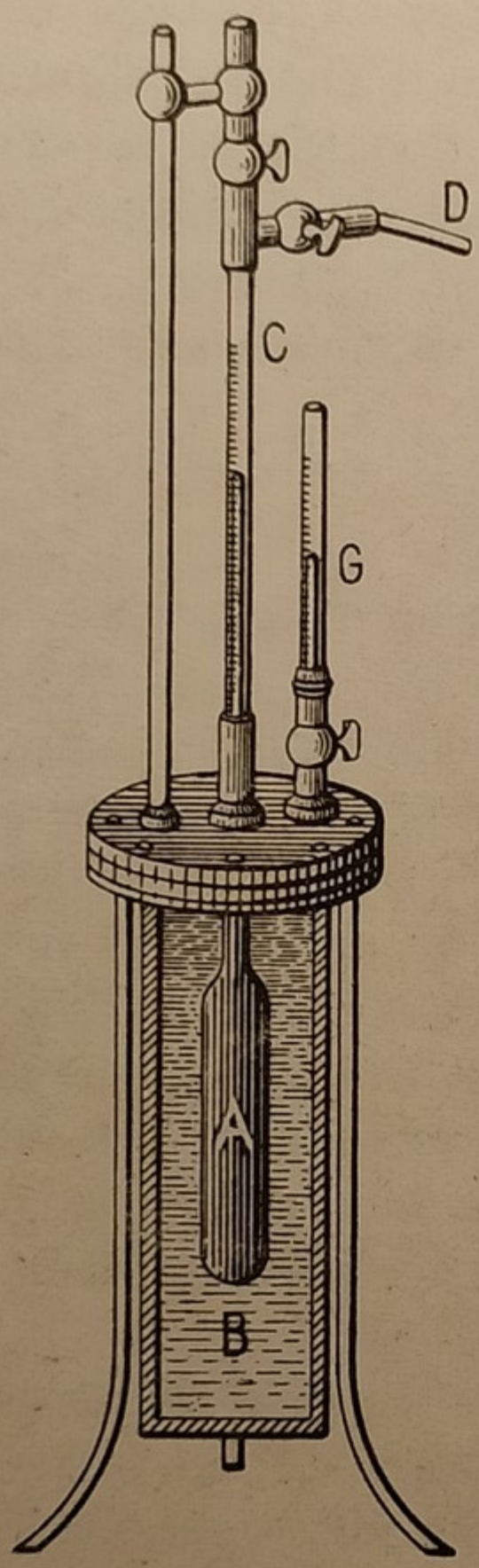

Fig. 115.

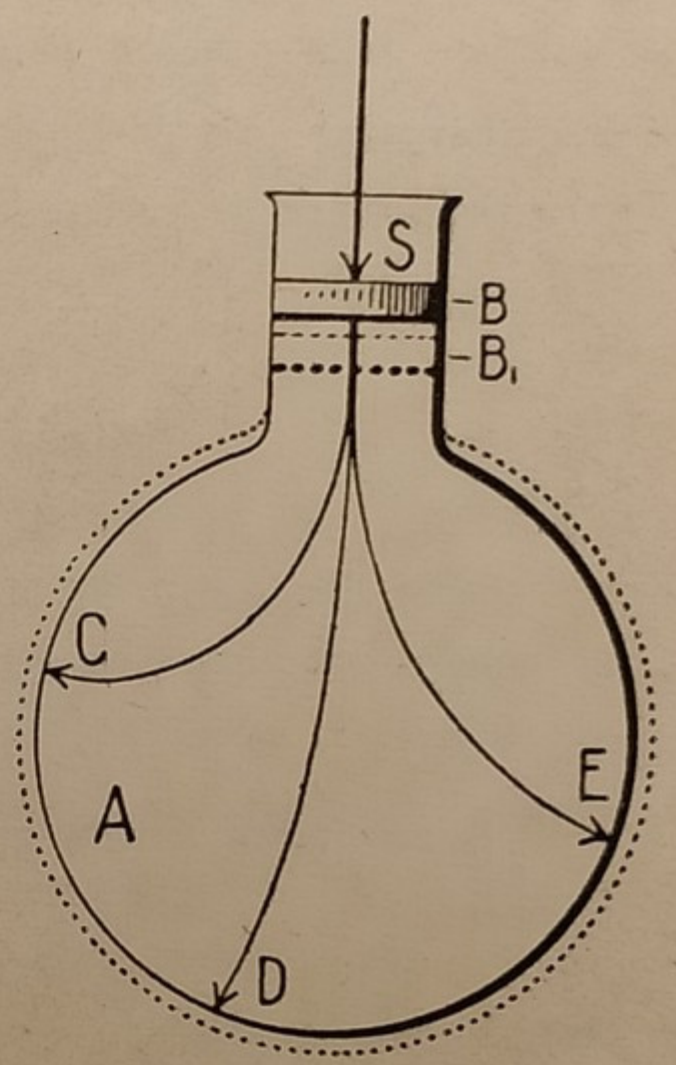

Fig. 116.

37. Trasmissione della pressione nei liquidi. — Prendiamo un liquido chiuso in un vaso A munito di un tubo cilindrico nel quale è impegnato uno stantuffo S (fig. 116). Esercitando su questo una forza lo si vedrà scendere da B a B_1, e ciò avviene non tanto per la diminuzione di volume del liquido che è insignificante, quanto per l'aumento di capacità del recipiente, perchè la pressione esercitata sullo stantuffo si fa sen-

tire su tutti i punti *CDE* delle pareti del vaso, in modo che ciascun centimetro quadrato di esse viene premuto da una stessa forza diretta verso l'esterno, normale alla superficie cioè perpendicolare alla stessa nel punto considerato.

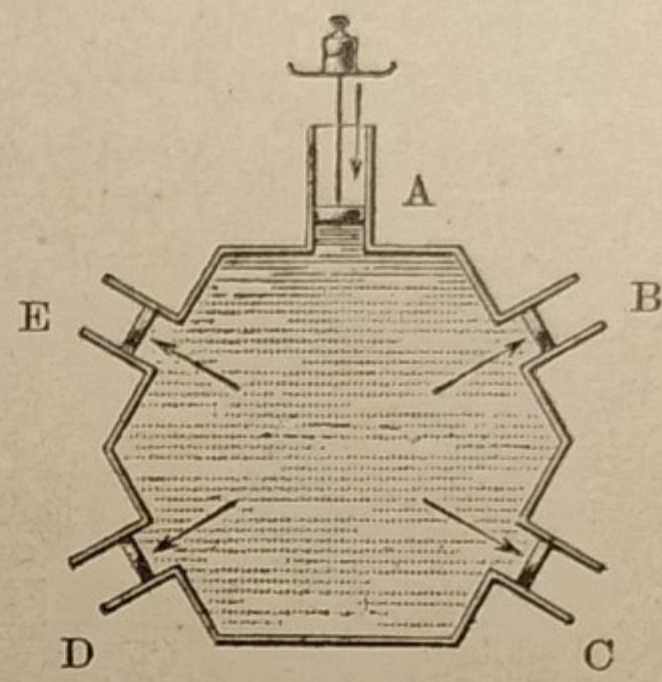

Fig. 117.

Il principio secondo il quale il liquido trasmette la pressione esercitatavi direttamente mediante lo stantuffo, è detto *Principio di Pascal* e viene così enunciato:

Se si esercita una pressione sopra una regione del liquido, essa si trasmette egualmente in tutte le direzioni.

Se, dunque, in un recipiente H si trovano delle aperture A, B, C... (fig. 117) munite di stantuffi di area S_1, S_2, S_3... e si esercita una forza F_1 sul primo, bisognerà applicare sugli altri per mantenerli in equilibrio delle forze F_2, F_3... tali che $F_1 : F_2 : F_3 ... = S_1 : S_2 : S_3 : ...$ ossia che:

$$\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2} = \frac{F_3}{S_3} = ... ;$$

vale a dire per l'equilibrio è necessario che *il rapporto fra la forza permente e l'area premuta rimanga costante*, cioè che la *pressione* sia eguale in tutti i punti delle pareti.

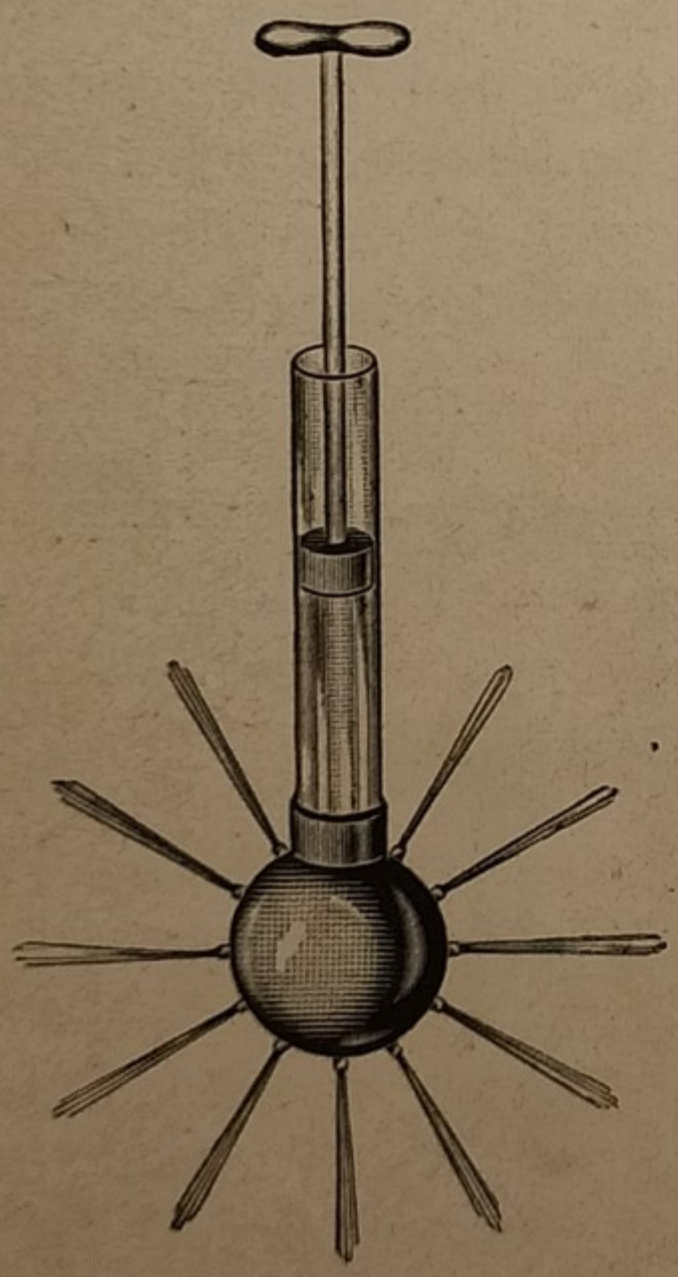
Fig. 118.

Il principio del Pascal non è suscettibile di una verifica sperimentale rigorosa per l'intervento di diversi elementi, quali l'attrito degli stantuffi, il peso di questi, e il peso del liquido, che concorrono a modificare il risultato finale. Tuttavia la verità di questa legge è provata dalle conseguenze che se ne deducono e che sono in armonia coi fatti.

Una dimostrazione di indole scolastica si può eseguire con l'apparecchio rappresentato dalla figura 118. Esso consiste

in una boccia metallica provvista di piccoli orifizi in diversi punti e unita ad un tubo cilindrico soprastante, nel quale è impegnato uno stantuffo a tenuta d'acqua. Immergiamo l'apparecchio nell'acqua sì da riempirnelo totalmente, e poi, toltolo fuori, spingiamo subito fortemente lo stantuffo; allora si vede l'acqua zampillare dai vari orifizi, e la direzione di ciascun zampillo essere normale alla superficie del recipiente.

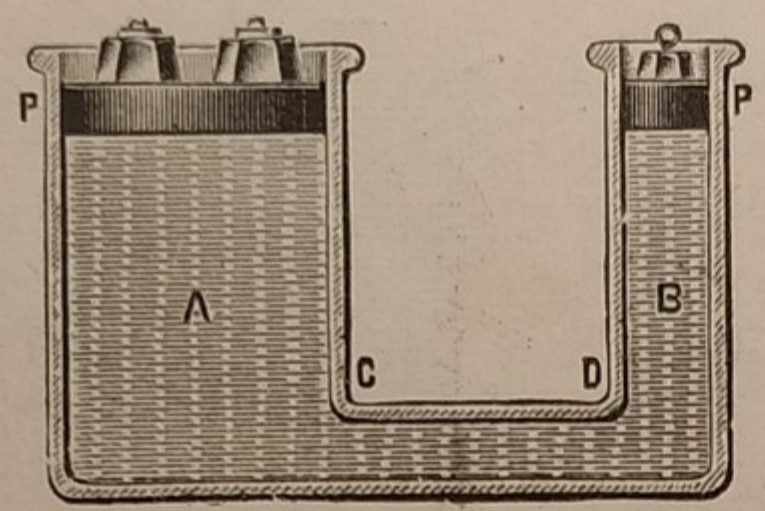

Fig. 119.

38. Torchio idraulico. — Numerose sono le applicazioni del principio di Pascal; fra tutte ci limiteremo a dire del *torchio idraulico*.

È una macchina che ridotta alla minima espressione è formata di due tubi cilindrici AB pieni di un liquido, muniti di stantuffi scorrevoli a perfetta tenuta, di sezioni S ed s molto diverse, riuniti mediante un tubo di comunicazione (fig. 119). Se gli stantuffi sono in equilibrio la pressione p del liquido è la stessa dappertutto, e quindi si ha che le forze ps e pS che

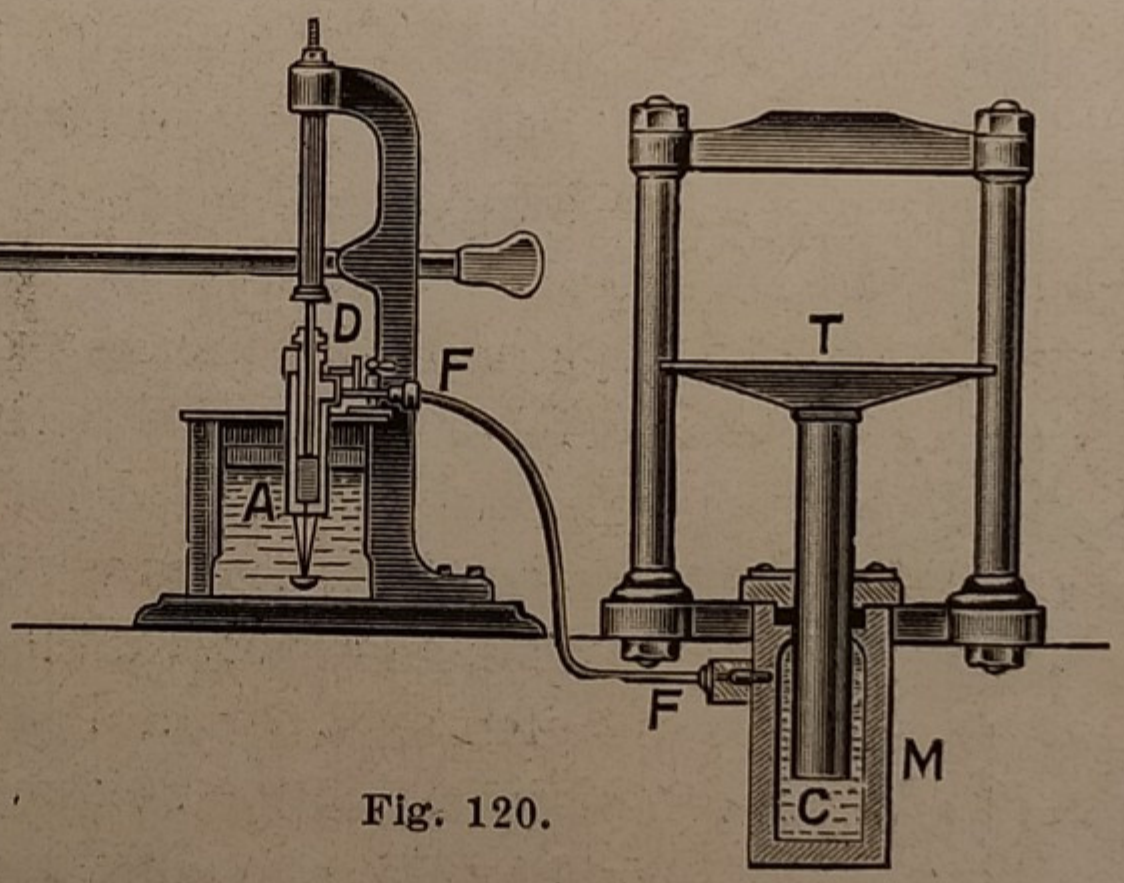

Fig. 120.

agiscono sugli stantuffi sono diverse; dimodochè se $S = 50\ s$, con una forza limitata ps si può equilibrare la forza $pS = 50\ ps$.

Il torchio idraulico (fig. 120) è una macchina di grande importanza, essa è la più potente macchina costruita per sollevare pesi o per esercitare delle grandissime pressioni.

In pratica è formata di una pompa A (57) che attinge l'acqua dal serbatoio sottostante e pel tubo F la inietta nel cilindro M, entro il quale scorre uno stantuffo C che porta la piattaforma T. Fra questa e un piano fisso superiore, tenuto fisso da colonne, si collocano i corpi da premere. La potenza agisce in L sopra lo stantuffo D mediante un lungo braccio di leva; in tal modo con una limitata potenza, quale si può sviluppare agendo a mano sulla leva, la pressione esercitata sui corpi che stanno sopra la piattaforma T, può risultare assai elevata. Con tale disposizione si possono agevolmente sollevare dei pesi di parecchie tonnellate.

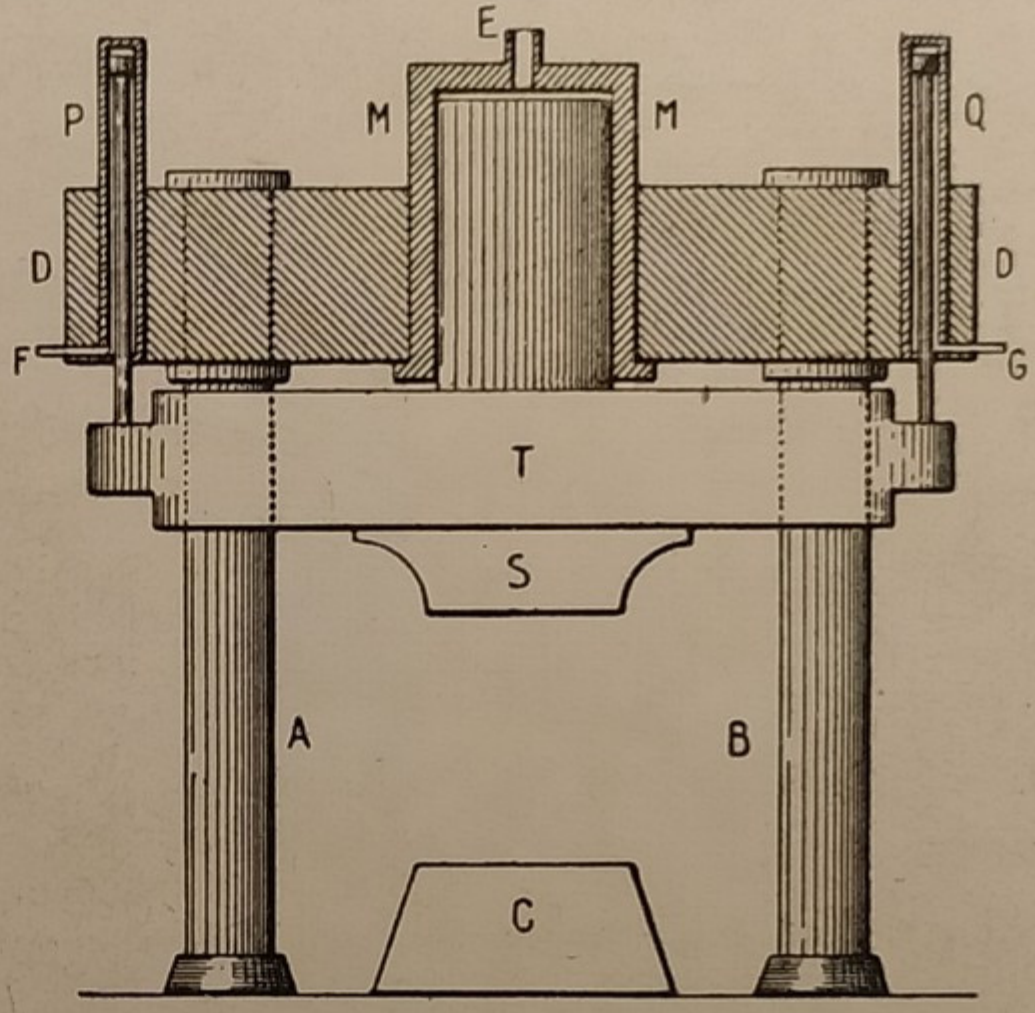

Fig. 121.

Un torchio idraulico di grande potenza è la così detta *pressa idraulica per forgiare.*

La figura 121 mostra una di tali presse, che sostituiscono oggi negli stabilimenti siderurgici i grandi magli, che una volta si usavano per la forgiatura dei grossi pezzi. Essa comprende 4 colonne-guide — nella figura se ne vedono due sole, A e B — fissate in basso a una robusta piattaforma piantata sul suolo dell'officina, sulla quale è poggiato l'incudine C; tali colonne portano un cappello superiore DD. Per l'uso di tali presse si ha un serbatoio d'acqua sotto forte pressione che invia l'acqua nel cilindro M e un secondo serbatoio a pressione inferiore che invia l'acqua nei rialzatori PQ che servono per sollevare il traversone mobile T e con questo la bocca del martello S che gli è unito. Per forgiare si fa arrivare per E l'acqua del serbatoio ad alta pressione nel cilindro M, con ciò lo stantuffo sotto la spinta dell'acqua fa discendere il traversone mobile e con questo il martello, che in tal modo viene a premere fortemente

contro il blocco da forgiare che poggia sull'incudine. Finita la corsa, occorre sollevare la traversa; per ottenere ciò si vuota il cilindro M e si fa arrivare per F e G l'acqua dal serbatoio a bassa pressione nei rialzatori PQ. Si costruiscono presse da forgiare per oltre 15 mila tonnellate.

39. Pressioni nei liquidi destate dalla gravità. — Un liquido in equilibrio soggetto alla sola gravità esercita una pressione su di un piano orizzontale AB (fig. 122) condotto dentro il liquido e tale pressione è la stessa su tutti i punti, ma cresce col crescere della profondità, anzi, a parità di altre condizioni, è proporzionale alla profondità stessa. Di modo che sopra una porzione di un piano orizzontale, condotto alla profondità di h^{cm}, avente S^{cm^2} di area, preme una colonna liquida del volume di Sh^{cm^3}, con la forza F equivalente al suo peso, che è:

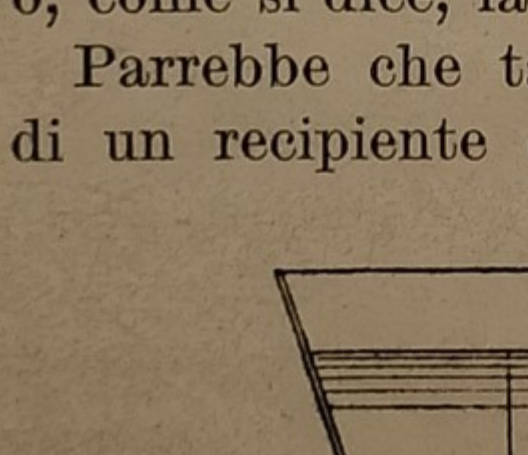

Fig. 122.

$$F = Shp \text{ grammi},$$

se p è il peso in grammi di un centimetro cubo del liquido, o, come si dice, la densità del liquido (44).

Parrebbe che tal risultato si dovesse avere solo nel caso di un recipiente di forma cilindrica, invece vale in tutti i

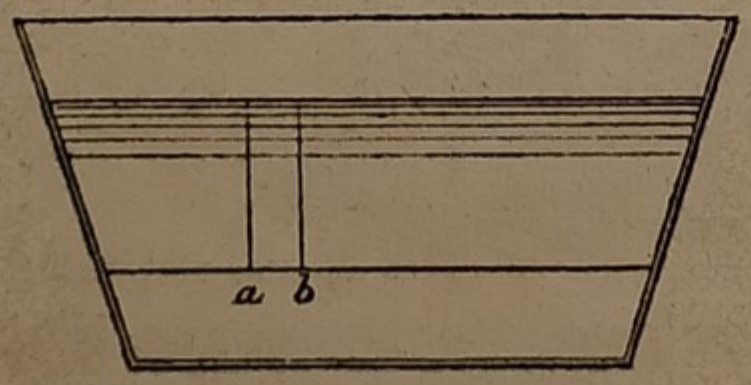

Fig. 123.

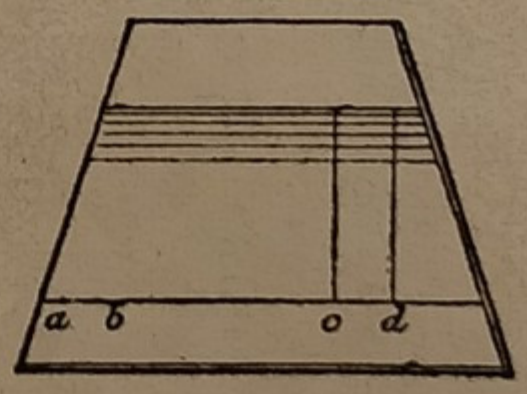

Fig. 124.

casi. Infatti in un vaso allargantesi in alto (fig. 123) la forza agente sull'elemento di superficie ab è esercitata direttamente dal filetto liquido che si appoggia sull'elemento. In un vaso che si restringe in alto (fig. 124) la forza è la stessa, su due

elementi eguali *ab* e *cd* presi sullo stesso piano orizzontale, perchè in *cd* la pressione è esercitata direttamente dal filetto liquido soprastante; in *ab* la pressione è esercitata indirettamente per trasmissione (37).

Dobbiamo poi notare che se una superficie liquida *S* situata sopra un piano orizzontale, dentro il liquido sopporta dall'*alto in basso* la forza di *Shp* grammi, essa deve, in virtù dell'equilibrio, sopportare dal *basso in alto* una forza eguale e contraria. Ciò si può anche provare sperimentalmente.

È chiaro che una lamina solida di spessore trascurabile posta ad occupare la posizione della superficie liquida prima considerata, risente le stesse pressioni, poichè queste derivano dal liquido che si appoggia contro di essa. Ed ecco come lo si verifica.

Un disco di vetro smerigliato, assai sottile, è sostenuto da un filo ed è applicato contro un cilindro di vetro il cui bordo inferiore è smerigliato (fig. 125); così si ha un recipiente a fondo mobile a perfetta tenuta. Immerso il cilindro nell'acqua, si osserva che il disco di vetro rimane appoggiato contro il tubo cilindrico anche abbandonando la funicella. Versando allora nel cilindro dell'acqua leggermente colorata, il disco si distacca per effetto del suo peso non appena esso sia soggetto alla stessa pressione all'interno e all'esterno; ciò arriva quando il livello del liquido è lo stesso fuori e dentro il cilindro.

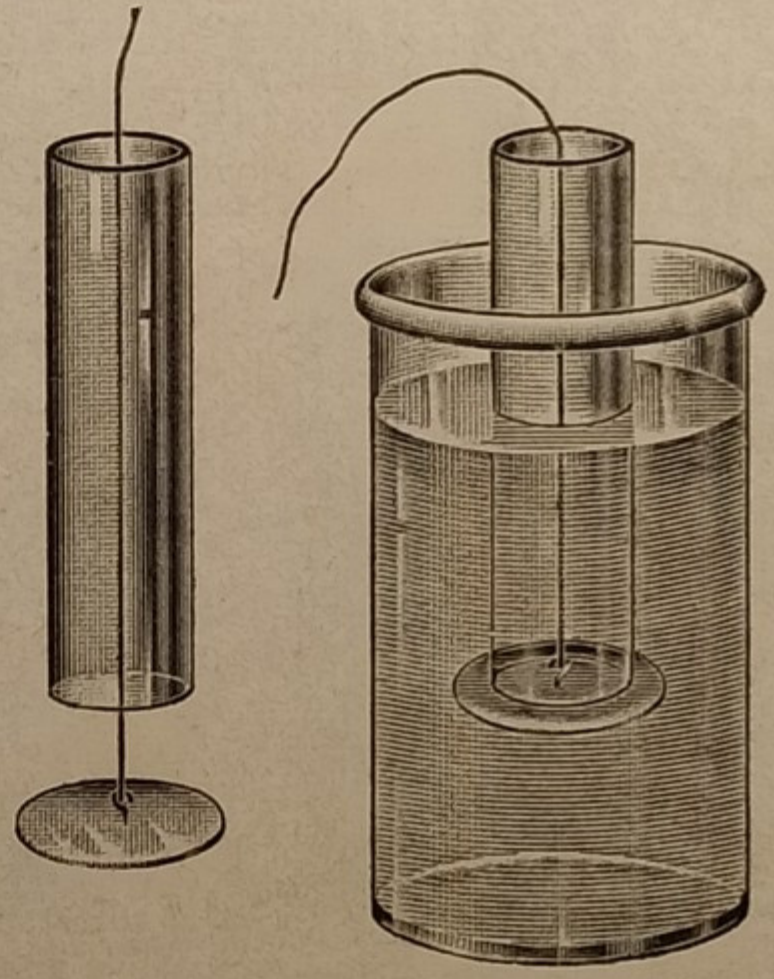

Fig. 125.

Oltre a ciò la pressione esercitata dal liquido è indipendente dall'orientazione di tal disco, come si potrebbe verificare ripetendo l'esperienza precedente con un tubo di vetro a base obliqua (fig. 126); anche in questo caso il disco non si distacca se non quando il liquido arriva dentro il tubo all'altezza del liquido esterno.

Per le ragioni sopra esposte un liquido esercita delle pressioni sul *fondo* e sulle *pareti* del recipiente. Se il fondo è piano e orizzontale ed ha un'area di S^{cm^2}, la forza che vi preme è sempre Shp grammi, dove h e p conservano il significato precedentemente esposto, e tal forza è indipendente dalla forma del vaso. Lo si verifica con l'apparecchio rappresentato dalla fig. 127. BC è un tubo di ferro che termina a sinistra con una ghiera di ferro filettata e a destra con un tubo di vetro $K'B'$;

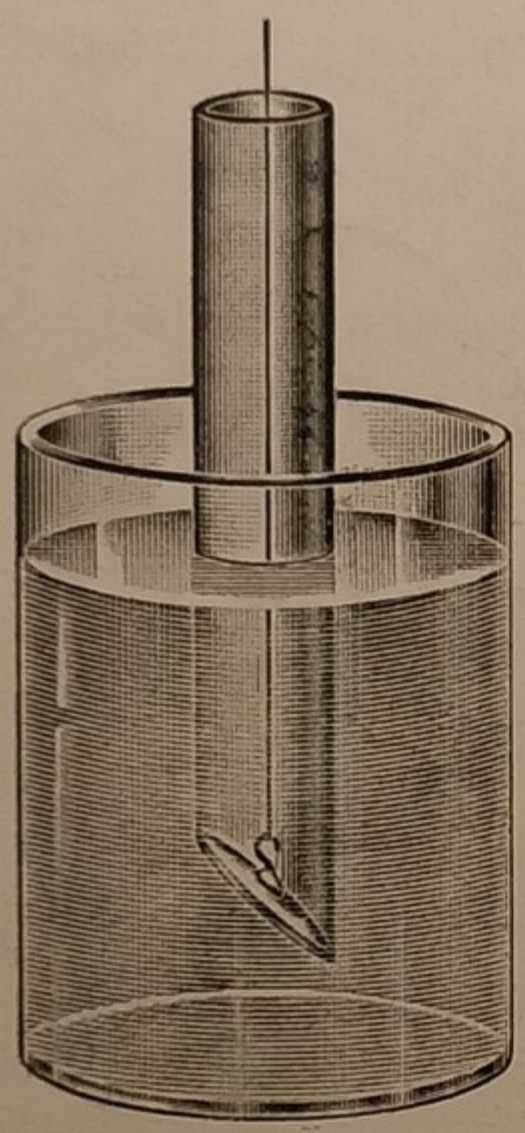

Fig. 126.

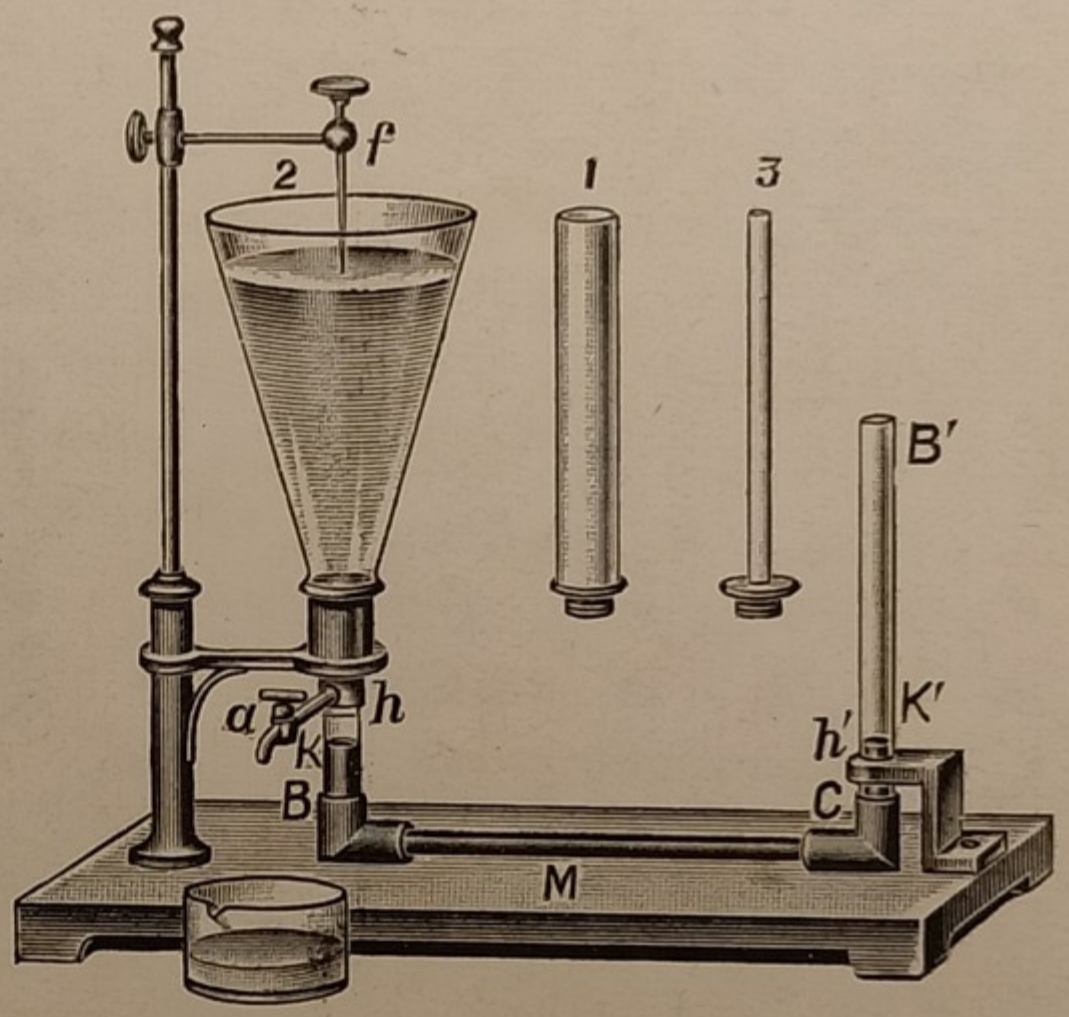

Fig. 127.

tale tubo contiene del mercurio. Fanno parte dell'apparecchio tre recipienti 1, 2, 3, di forma diversa, aperti in basso e portanti una ghiera filettata, sì da poterli avvitare sulla ghiera fissa. Messo a posto uno qualunque dei tre recipienti, vi si versa dell'acqua fino ad una certa altezza, precisata dall'indice f e si nota, facendo uso di un anellino scorrevole sopra il tubo di vetro $K'B'$, l'altezza che vi acquista il mercurio. Si vedrà che questa altezza è sempre la stessa qualunque sia il recipiente adoperato, purchè in ogni caso l'acqua arrivi alla stessa altezza. In ognuna di queste prove il fondo piano e orizzontale è costituito dalla superficie libera del mercurio nel ramo di sinistra, per cui si conclude che la pressione che un liquido esercita sopra il fondo del vaso è indipendente dalla forma del vaso stesso,

Le *pareti laterali* sopportano pure delle pressioni trasmessevi per effetto del principio di Pascal; e la pressione è in ciascun punto *normale* alla parete. Ciò è provato dal fatto

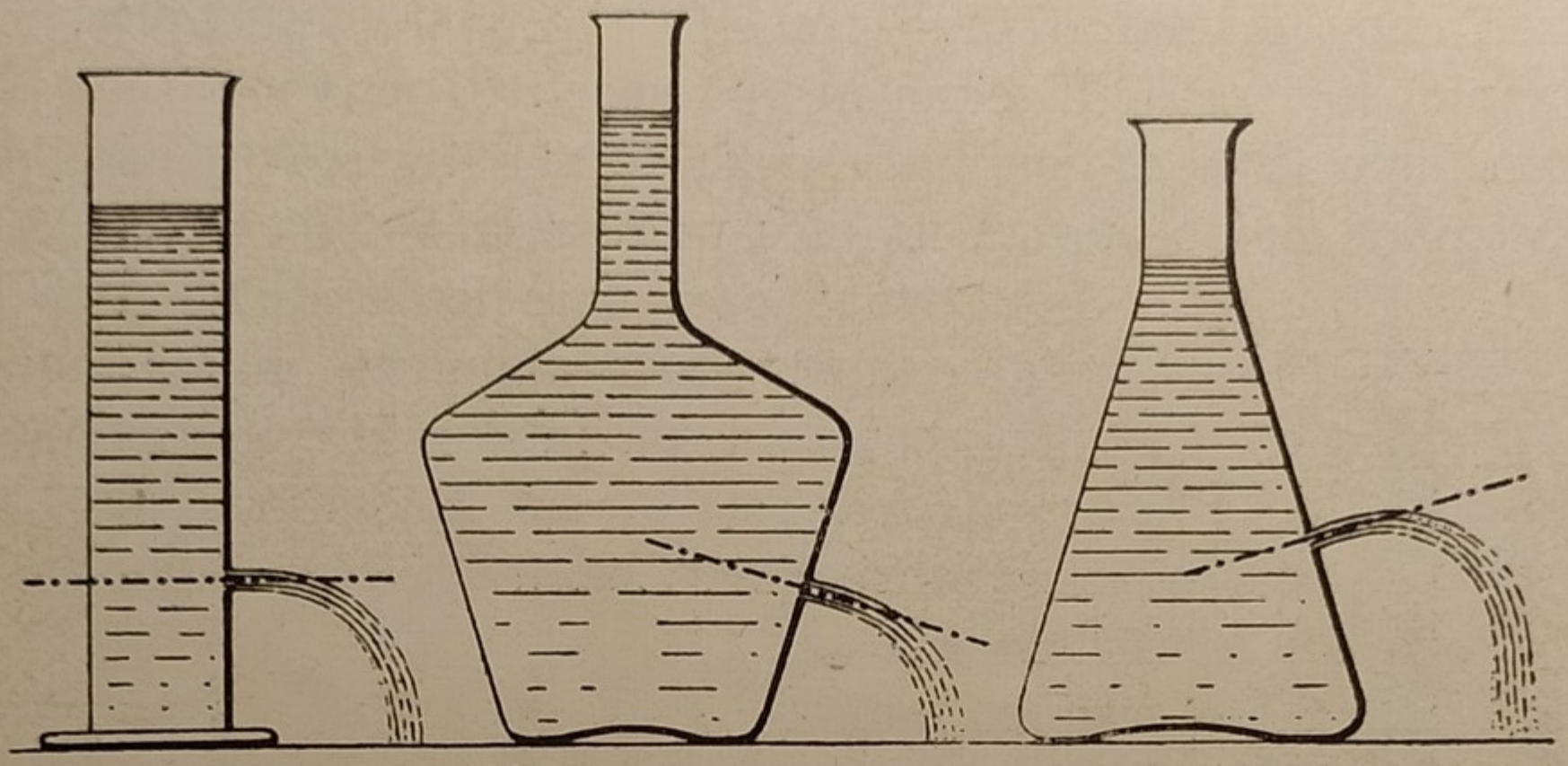

Fig. 128.

che praticando un forellino in un punto della parete, il getto liquido, in corrispondenza del foro d'uscita del vaso, ha in tutti i casi una direzione normale alla parete (fig. 128).

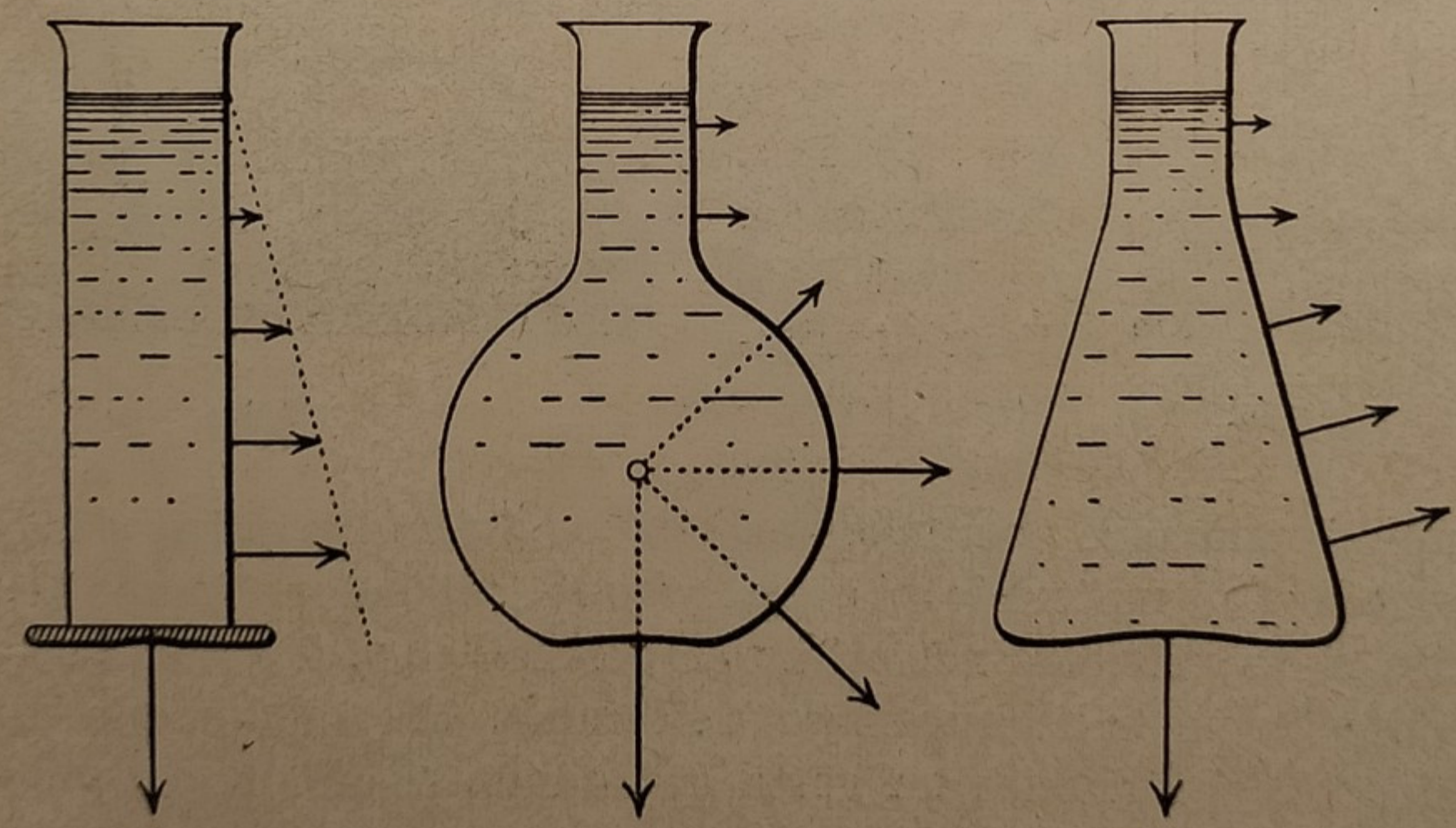

Fig. 129.

La figura 129 illustra la distribuzione delle pressioni sulle pareti di alcuni vasi, per i quali la varia lunghezza delle freccie

indica i valori rispettivi delle diverse pressioni, che, come si sa, aumentano colla profondità.

In generale le pressioni laterali, in causa della resistenza delle pareti, non si manifestano con effetti apparenti; ma se, ad esempio, si versa dell'acqua in una specie di provetta formata di un largo tubo di gomma, si vede formarsi verso il basso una dilatazione, come mostra la linea punteggiata della figura 130.

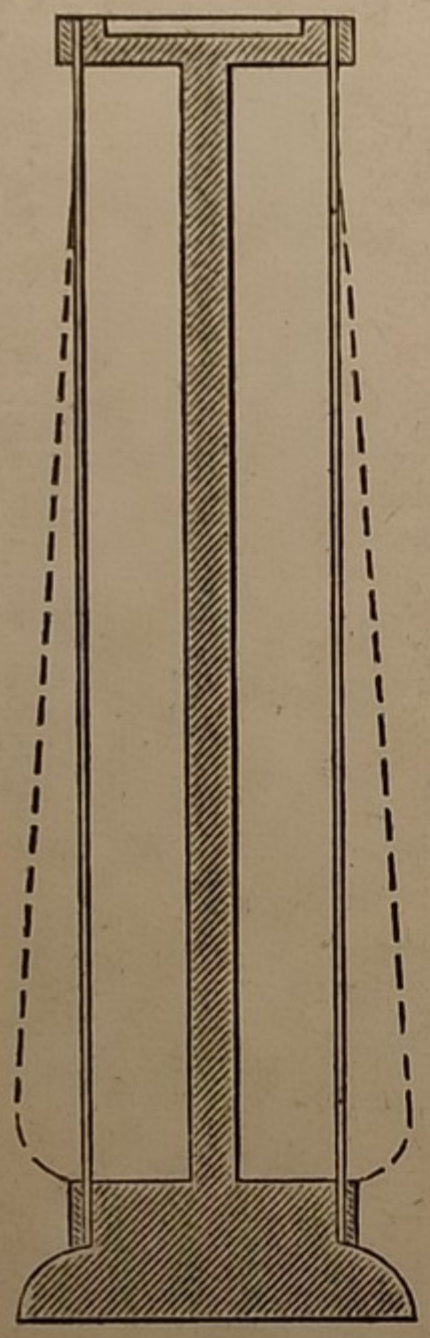

Fig. 130.

In tutti i casi però le pressioni che il liquido esercita sia lateralmente sia sul fondo costituiscono un sistema di forze equilibrato *orizzontalmente*; con ciò intendiamo che le componenti orizzontali di tutte le pressioni costituiscono un sistema equilibrato, mentre le componenti verticali hanno per risultante una forza diretta verso il basso che è il peso del liquido. Perciò, se si rende il vaso libero di muoversi orizzontalmente,

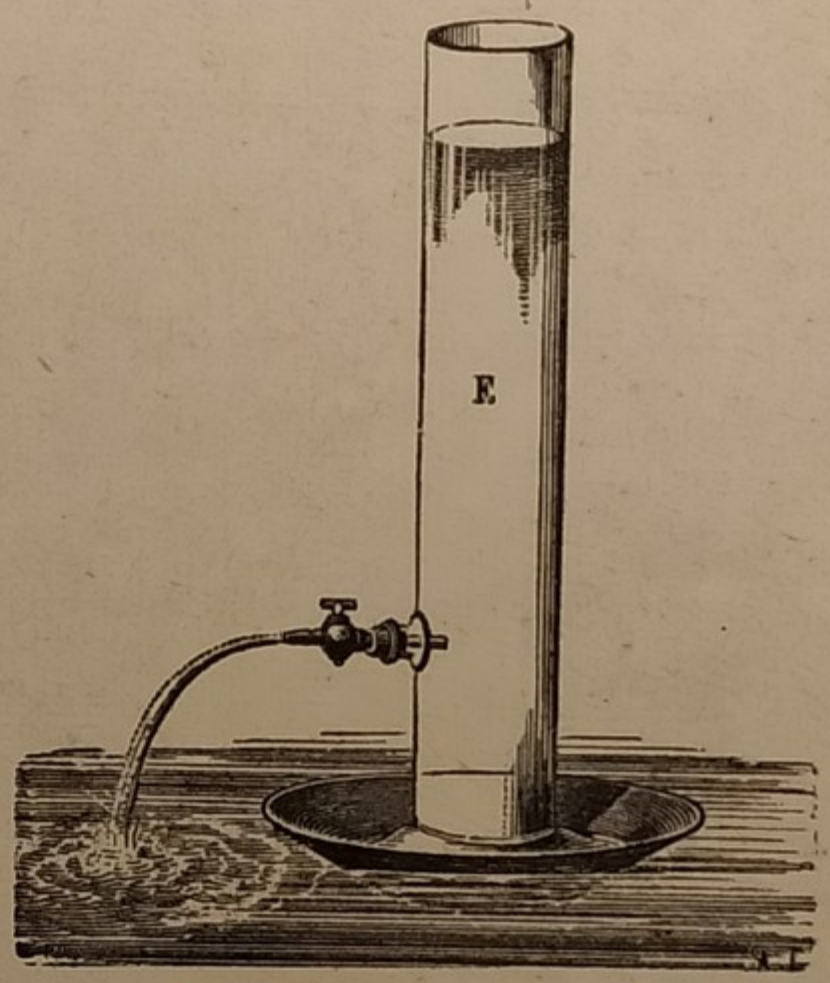

Fig. 131.

come si può fare sospendendolo a una funicella a mo' di un piombino, o mettendolo a galleggiare sull'acqua (fig. 131), il filo resta verticale nel primo caso e nell'altro il galleggiante rimane fermo sulla superficie dell'acqua. Ma se aprendo un robinetto, si fa uscire un getto di liquido, si annulla la pressione che agiva sull'elemento di parete che aprendo il robinetto è stato soppresso, e la pressione rimanente sull'elemento di parete opposto al robinetto, obbliga il galleggiante a muoversi decisamente dalla sua parte. Si ha così il *galleggiante a reazione*,

Lo stesso fenomeno si verifica nell'*arganetto idraulico* (fig. 132). È un vaso a forma di pera, portante in basso due tubi diametralmente opposti, le cui estremità, ricurve orizzontalmente nello stesso verso, sono aperte. Il vaso pieno d'acqua è mobile attorno ad un asse verticale. L'acqua esce contemporaneamente dalle due aperture e l'apparecchio ruota in *senso inverso* ai getti liquidi. Infatti, riferendoci alla figura 133 che rappresenta i tubi inferiori in sezione perpendicolare all'asse di rotazione, gli elementi A_1 e B_1 opposti alle aperture A e B sopportano delle pressioni orizzontali F_1 e H_1 che sono equilibrate dalle F e H quando le aperture son chiuse, ma quando queste sono aperte rimangono attive solo le prime due forze che determinano un moto rotatorio nel senso della freccia.

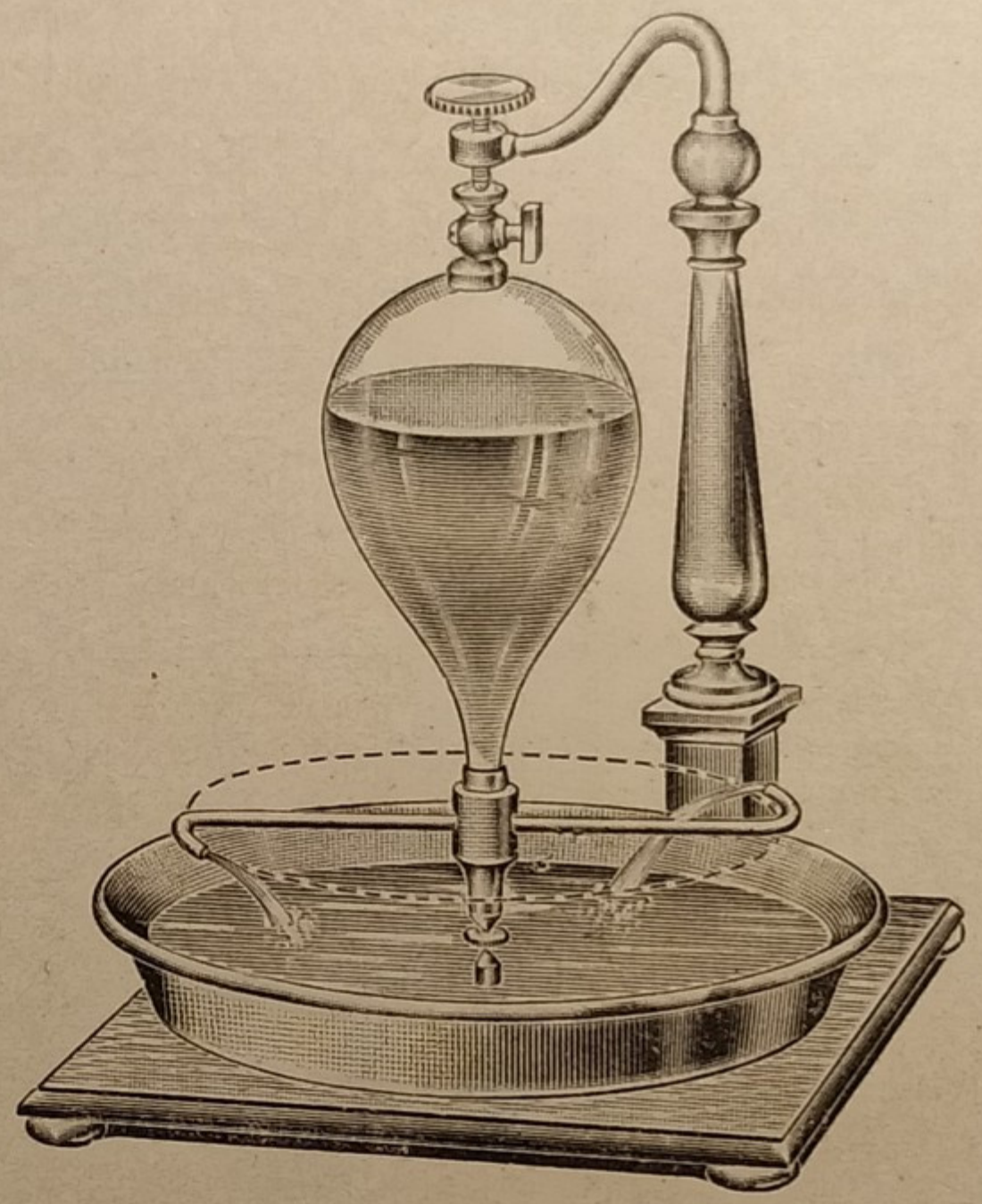

Fig. 132.

Questo fenomeno viene utilizzato in grande nelle così dette *turbine a reazione*.

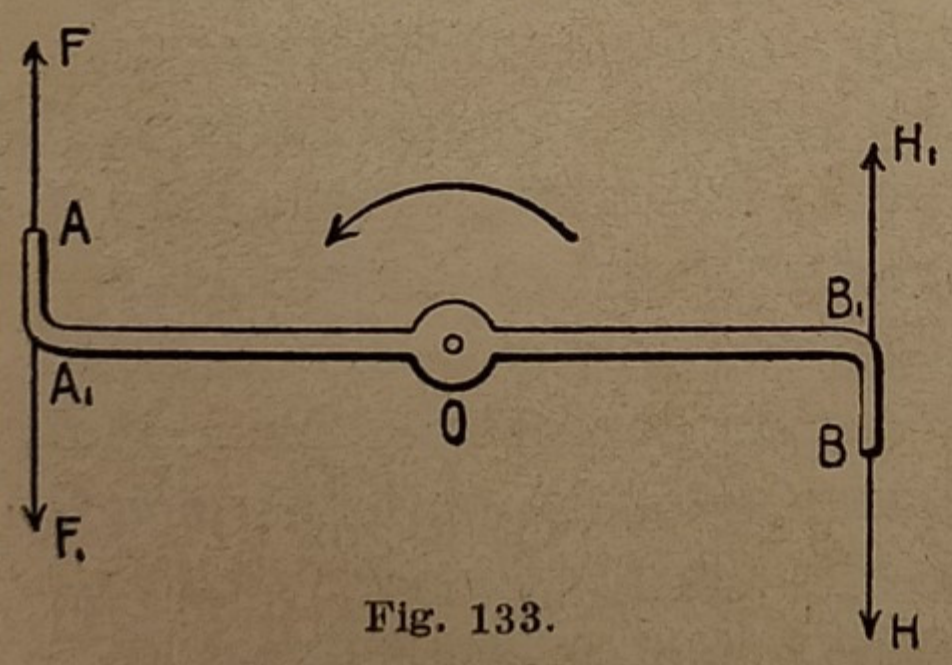

Fig. 133.

40. — Vasi comunicanti e applicazioni. — Quando un liquido è posto in due o più vasi di forma qualunque, comunicanti fra loro, il sistema forma un *vaso unico*; perciò le *superficie libere* sono sopra uno stesso piano orizzontale. Ciò è sperimentalmente

provato coll'apparecchio della figura 134, formato di un grande recipiente V che comunica in basso con un tubo orizzontale, munito di robinetto R, alla estremità del quale può unirsi uno qualunque dei tubi 1, 2, 3. In ogni caso si riscontra che l'acqua arriva alla stessa altezza nel vaso V e nel tubo comunicante con esso. La stessa verifica si può eseguire più semplicemente con due tubi qualunque riuniti alla loro parte inferiore mediante un tubo di gomma. Un liquido che vi si versi prende lo stesso livello nei due tubi qualunque sia la loro posizione relativa e il loro diametro.

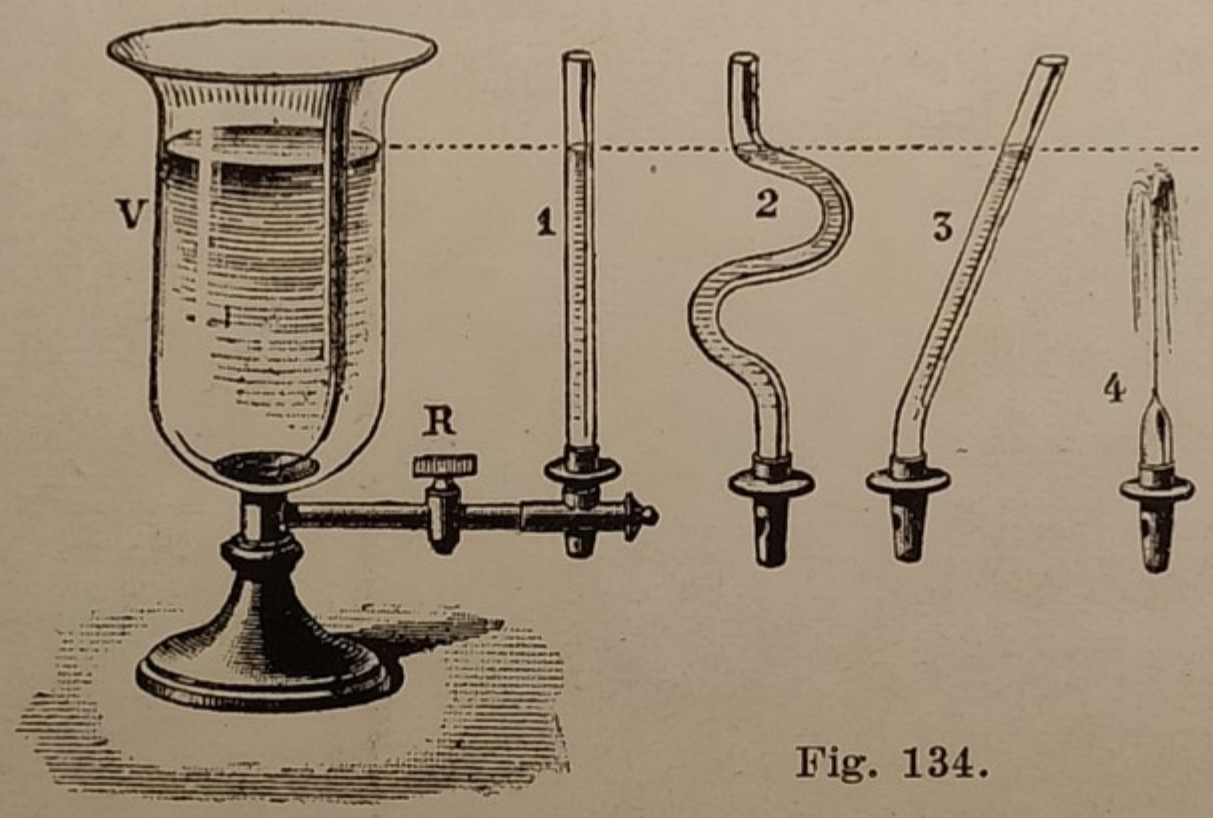

Fig. 134.

I mari e gli oceani costituiscono degli immensi vasi comunicanti; perciò, in essi si trovano alla stessa altezza tutti i punti della superficie libera, che è presso a poco sferica. Il livello del mare si prende come punto di partenza per la misura delle altezze alla superficie del globo. Notisi che i mari interni possono avere altezza diversa dagli oceani; così il Mar Nero, in causa della grande quantità d'acqua apportatavi dai grandi fiumi che vi sboccano, ha un'altezza qualche po' superiore al Mediterraneo, dimodochè verso di questo si manifesta una rapida corrente attraverso lo Stretto dei Dardanelli.

I *getti d'acqua* trovano pure la loro spiegazione nel principio dei vasi comunicanti. Se nell'apparecchio della figura 134 al tubo 1 si sostituisce il tubo 4, troppo corto perchè il liquido possa, aperto il robinetto, elevarsi alla stessa altezza di V,

il liquido esce formando uno zampillo verticale. La resistenza dell'aria e l'urto delle goccie che ricadono diminuiscono l'altezza a cui il liquido s'innalza.

I *pozzi artesiani* funzionano anche col principio dei vasi comunicanti.

Sia *R* (fig. 135) un serbatoio d'acqua, che può essere un lago, un nevaio, ecc. Può avvenire che esista nell'interno del terreno una comunicazione, per mezzo di canali tra tale serbatoio e uno strato sabbioso e quindi permeabile all'acqua

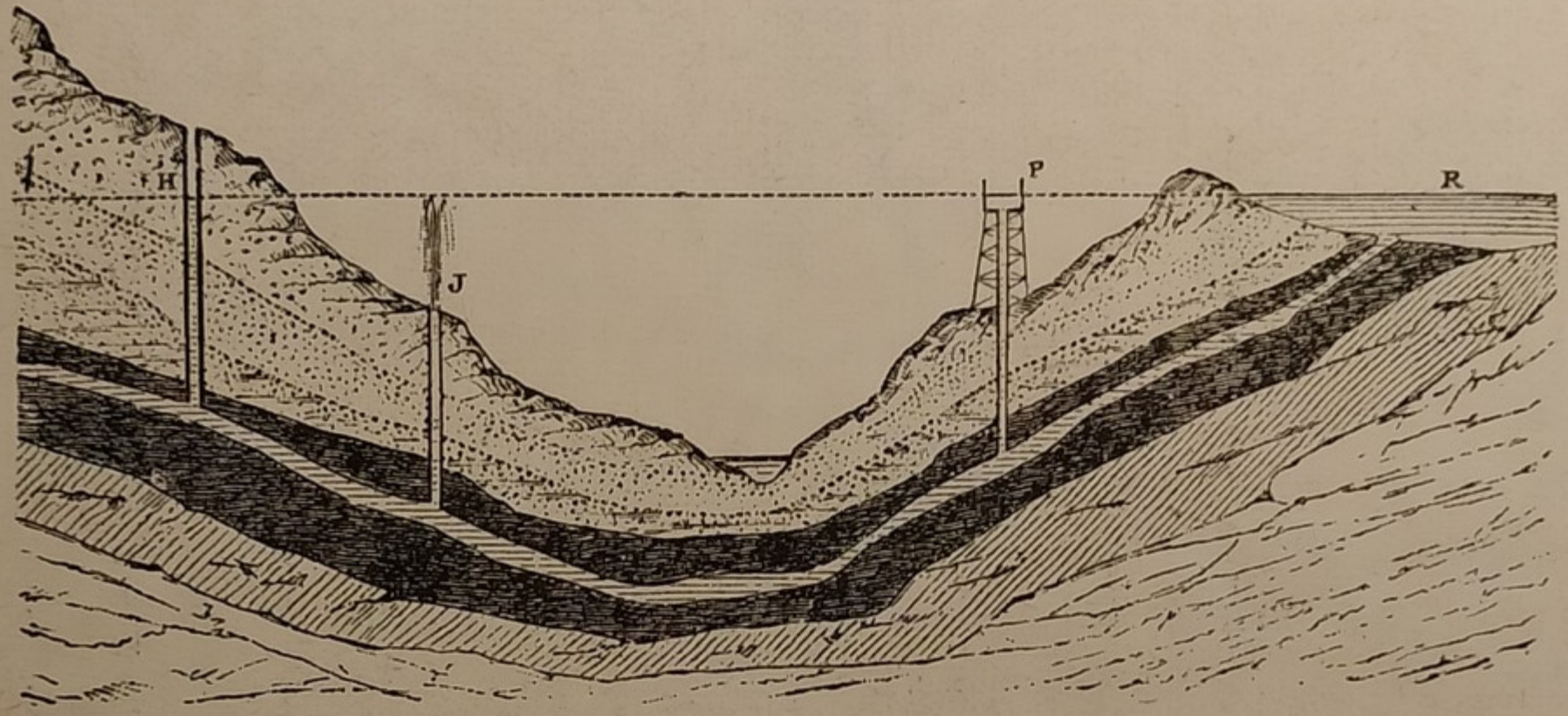

Fig. 135.

compreso fra due strati di terreno impermeabile. Se in tali condizioni si perfora il terreno piantandovi dei tubi *H*, *J*, *P* che arrivino alla falda acquifera, avviene che l'acqua può effluire zampillando.

Per la *distribuzione dell'acqua* potabile nelle città, l'acqua è accumulata in un grande serbatoio assai elevato, dal quale partono i grandi tubi di distribuzione. Le diramazioni di questi tubi, munite di robinetti, arrivano ai diversi piani delle case, dimodochè, quando si apre un robinetto, l'acqua esce perchè tende ad elevarsi al livello del serbatoio. La velocità di efflusso cresce col crescere della differenza di livello fra il robinetto e il serbatoio.

La *livella ad acqua* è un tubo metallico, le estremità del quale sono piegate in su e terminano con due tubi di

vetro A, A' (fig. 136). Il tubo è sorretto da un treppiede S. Il piano orizzontale che passa per la superficie libera

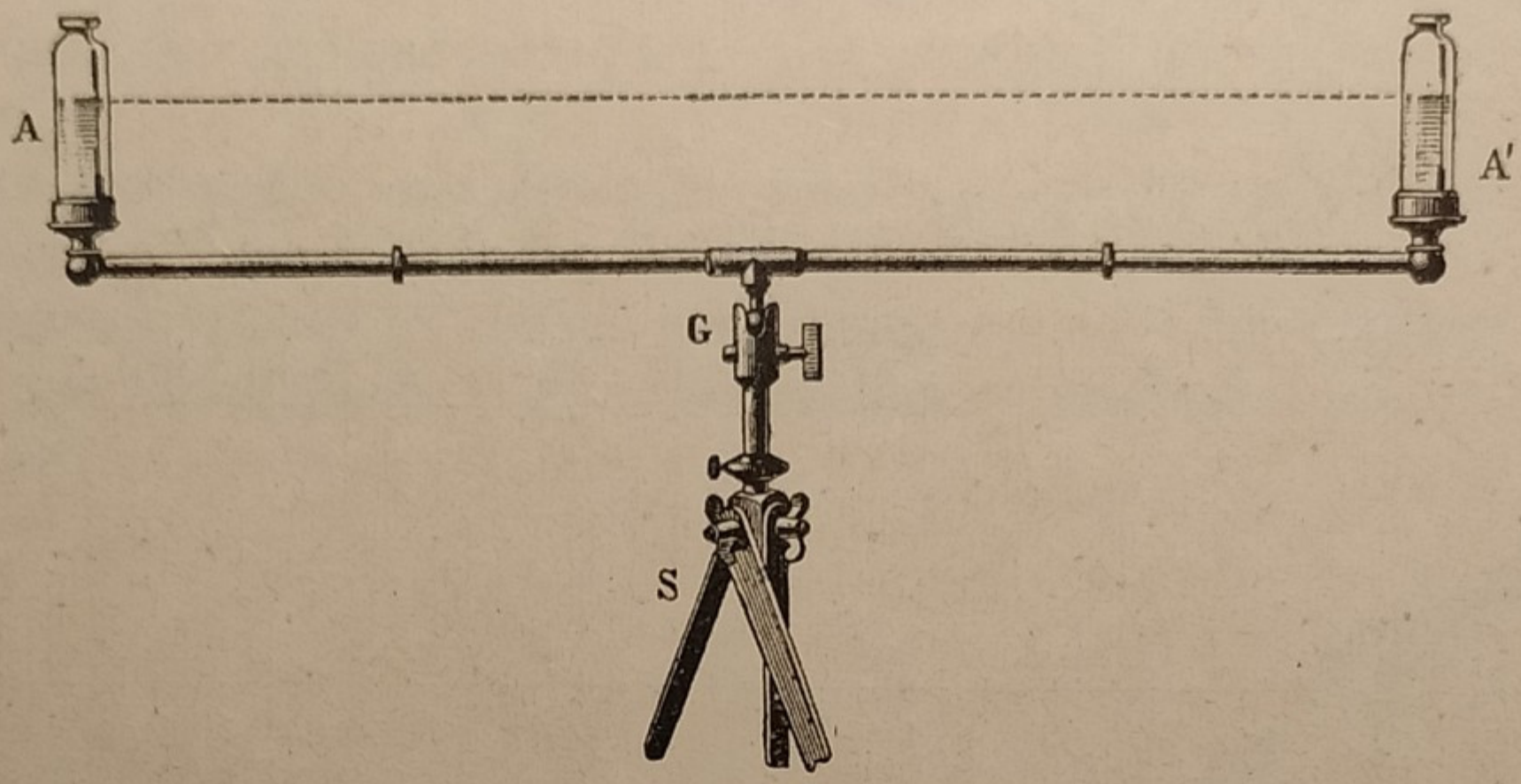

Fig. 136.

dell'acqua colorata versata nei due vasi comunicanti, serve da piano di riferimento.

Con tale apparecchio si può facilmente misurare la differenza di livello fra due punti A, B presi sul terreno (fig. 137).

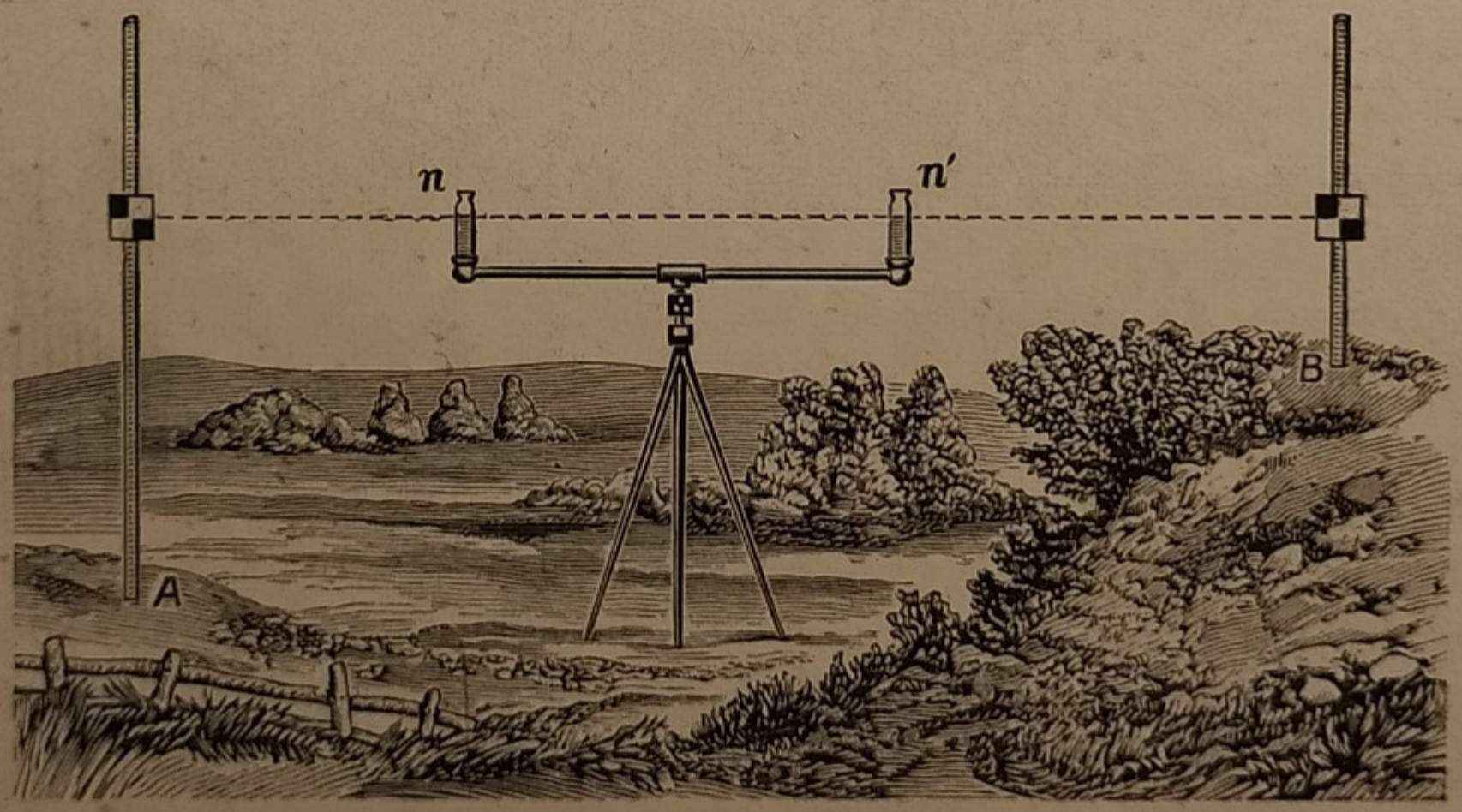

Fig. 137.

La livelletta viene collocata in una posizione intermedia; in A viene fissato un regolo verticale diviso, lungo il quale

è scorrevole una tavoletta detta *biffa* e l'operatore mette l'occhio in n' e dirige il raggio visuale secondo la linea $n'n$ che sfiora le superfici libere dell'acqua nei due tubi di vetro; il *raggio visuale è allora orizzontale.* Un assistente sposta lentamente la biffa, finchè sarà avvisato dall'operatore che il centro di essa coincida col raggio visuale, e legge l'altezza del centro della biffa dal punto A. L'assistente trasporta poi il regolo in B, l'occhio viene posto in n e si mira secondo nn'; anche in questo caso il centro della biffa vien fatto coincidere col raggio visuale e si legge l'altezza del centro dal punto B. La misura cercata è la differenza delle altezze lette sul regolo nei due casi.

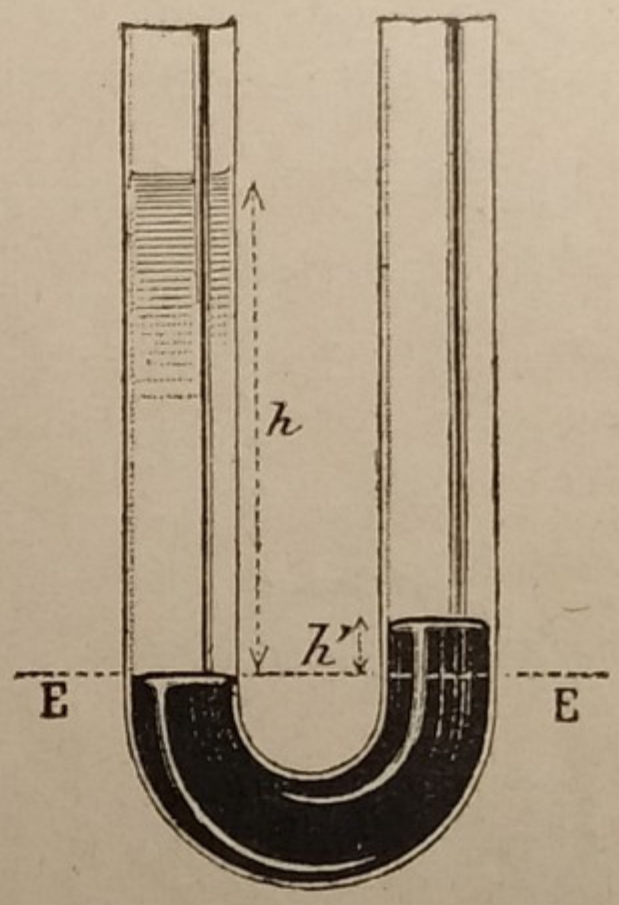

Fig. 138.

Se invece poi in due vasi comunicanti si pongono due liquidi *non miscibili*, il liquido di densità maggiore occupa il tubo di comunicazione e *le altezze dei due liquidi al disopra del piano orizzontale, che comprende la superficie di separazione, sono in ragione inversa delle densità.* Ciò si prova versando nel tubo ad **U** della figura 138 prima del mercurio e poi, sopra il mercurio, da una sola parte, dell'acqua.

41. Principio di Archimede. — Un liquido pesante agisce sopra la superficie di un corpo immerso come sulle pareti d'un vaso. Le forze agenti sui singoli punti della superficie totale del corpo immerso hanno una risultante verticale detta *spinta, diretta verticalmente dal basso in alto, eguale al peso del liquido spostato e applicata nel centro di gravità di questo ultimo.* Tale punto di applicazione vien detto *centro di spinta.*

Per dimostrare questo celebre principio, dovuto ad Archimede di Siracusa, pensiamo a una superficie ideale, che, come un velo, isoli una porzione di liquido contenuto in un recipiente. Dappoichè il liquido contenuto non discende malgrado il suo peso, ciò prova che l'insieme delle pressioni subìto da

parte del liquido circostante, eguaglia il suo peso: naturalmente questa risultante delle pressioni conserverà lo stesso valore se, al posto del liquido, si sostituisce un corpo limitato dalla medesima superficie.

Il principio d'Archimede è suscettibile d'una dimostrazione sperimentale. Si usa a tale scopo il *doppio cilindro* di Archi-

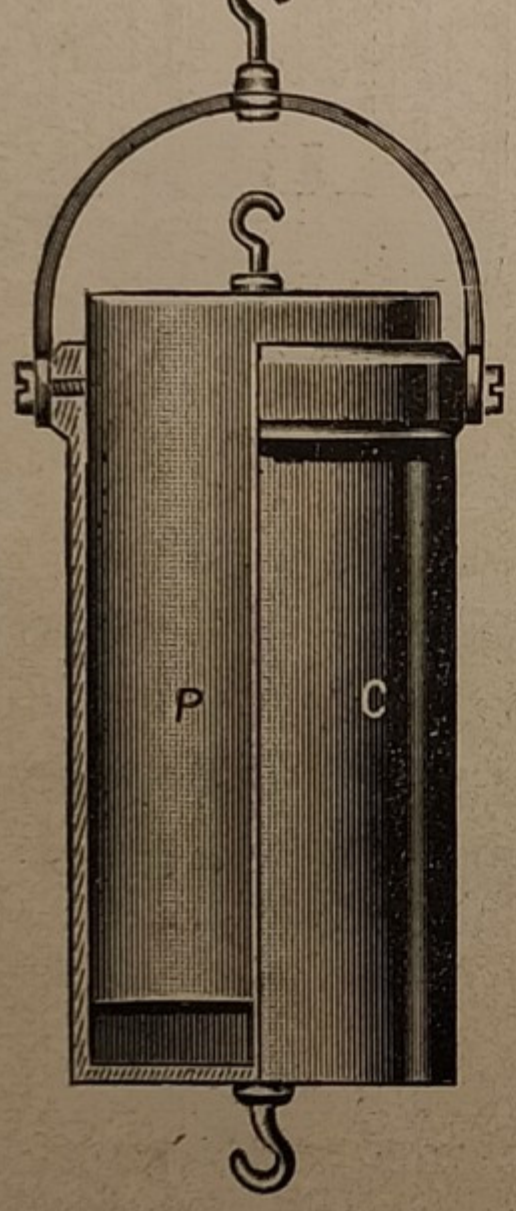

Fig. 139.

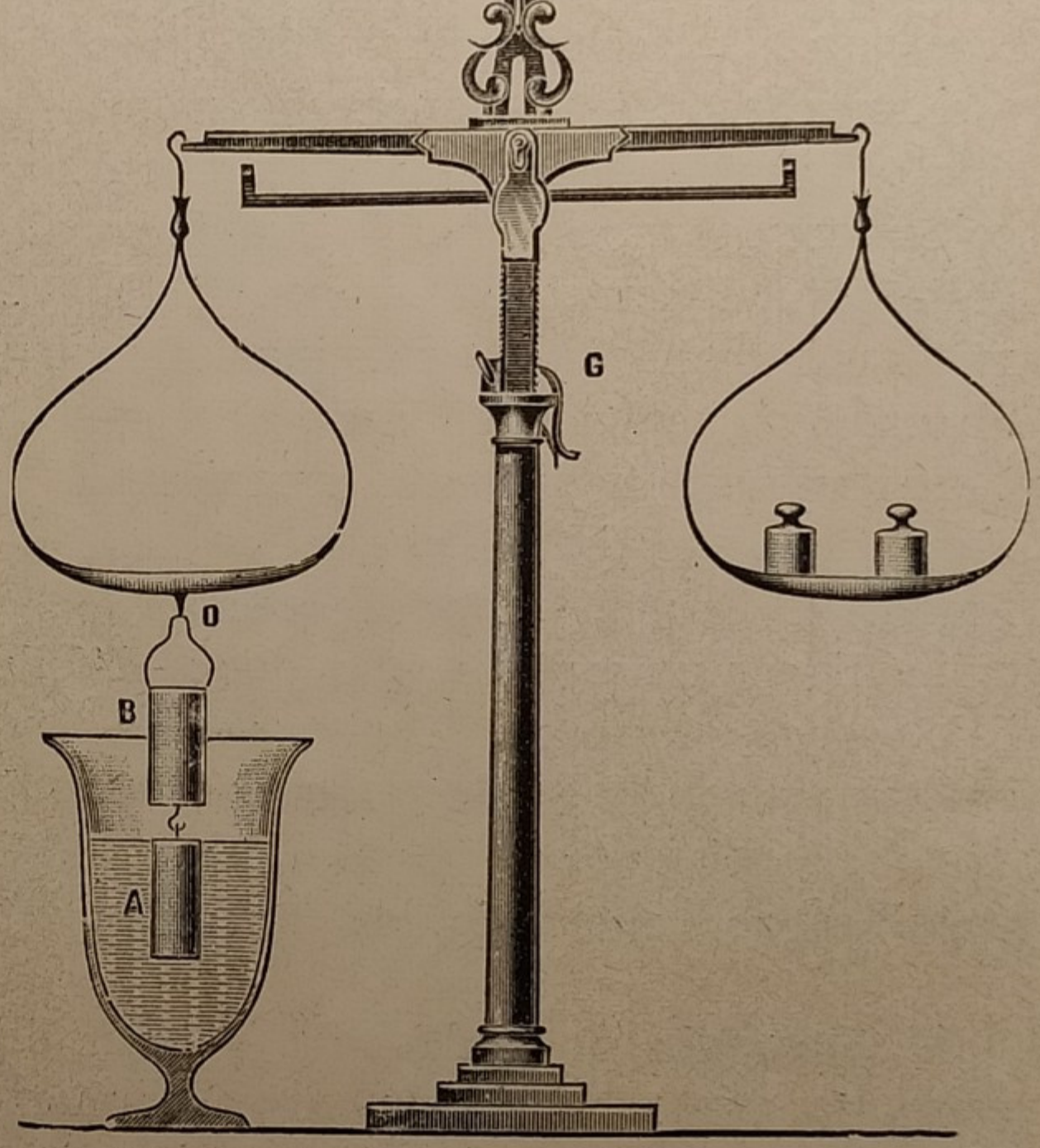

Fig. 140.

mede (fig. 139); esso è formato di due cilindri metallici, l'uno cavo C e l'altro massiccio P che può occupare esattamente la cavità del primo.

Ad uno dei piatti della *bilancia idrostatica*, che la figura 140 illustra, senza bisogno di particolari spiegazioni, si sospende il cilindro cavo B e sotto questo il cilindro massiccio A. Si fa l'equilibrio caricando dei pesi o anche semplicemente della tara sull'altro piatto. Si fa allora pescare il cilindro massiccio

in un bicchiere pieno d'acqua, con che esso riceve una spinta dal basso in alto; l'equilibrio è rotto, ma viene ristabilito se si riempie d'acqua il cilindro cavo. La spinta è dunque eguale al peso dell'acqua che riempie il cilindro vuoto, ossia dell'acqua spostata dal cilindro massiccio.

42. Equilibrio dei galleggianti. — Un corpo totalmente immerso è dunque soggetto a due forze: 1° il suo peso P, applicato dall'alto in basso al suo centro di gravità; 2° la spinta S eguale al peso del liquido spostato, agente dal basso in alto nel centro di spinta.

La forza che tende a far cadere il corpo nel liquido è la differenza $P - S$. Questa differenza fra il peso del corpo e la spinta è detta *peso apparente*.

Per $P > S$ il corpo cade, com'è il caso del ferro nell'acqua, ma la sua caduta, data la forte resistenza offerta dal liquido, è meno rapida che nell'aria.

Per $P < S$ il corpo sale verso la superficie — sughero nell'acqua, ferro nel mercurio. — Quando emerge dall'acqua, la spinta diminuisce, e arriva il momento in cui essa *diventa eguale al peso che rimane costante*. Da quel momento il corpo cessa di salire, esso *galleggia* e rimane in equilibrio sotto l'azione di due forze eguali ed opposte.

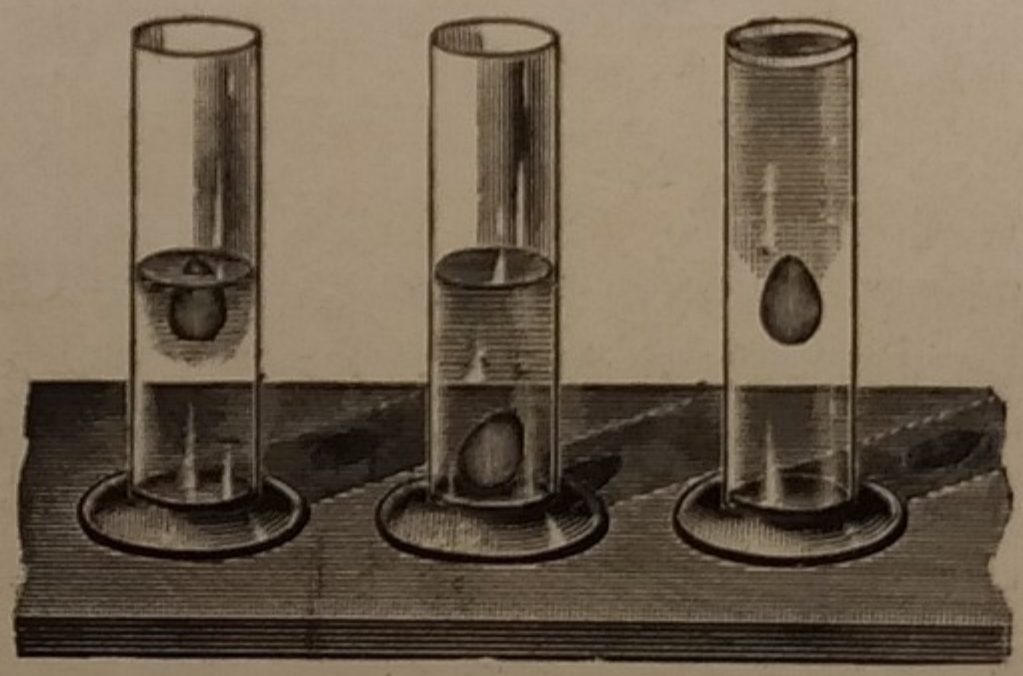

Fig. 141.

Per $P = S$ il corpo resta sommerso senza salire nè scendere. Si possono realizzare i tre casi con un uovo fresco; esso cade al fondo nell'acqua pura, perchè la sua densità media supera quella dell'acqua; in acqua satura di sal di cucina galleggia; in un miscuglio conveniente di acqua pura e acqua salata resta sospeso nel liquido (fig. 141).

Le tre condizioni si possono realizzare anche col *diavolino di Cartesio* o *ludione* (fig. 142). È formato di una figurina cava di smalto, alla quale si dà spesso la forma di un diavolino, avente un piccolo foro in basso. Nell'interno si trova qualche po' di acqua e sopra questa dell'aria; in tali condizioni esso galleggia sopra l'acqua contenuta in una provetta. Ma se si preme la membrana che è legata all'apertura della provetta, la pressione si trasmette per tutto il liquido, l'acqua penetra nella figurina, ne aumenta il peso e la fa scendere. Cessando

Fig. 142.

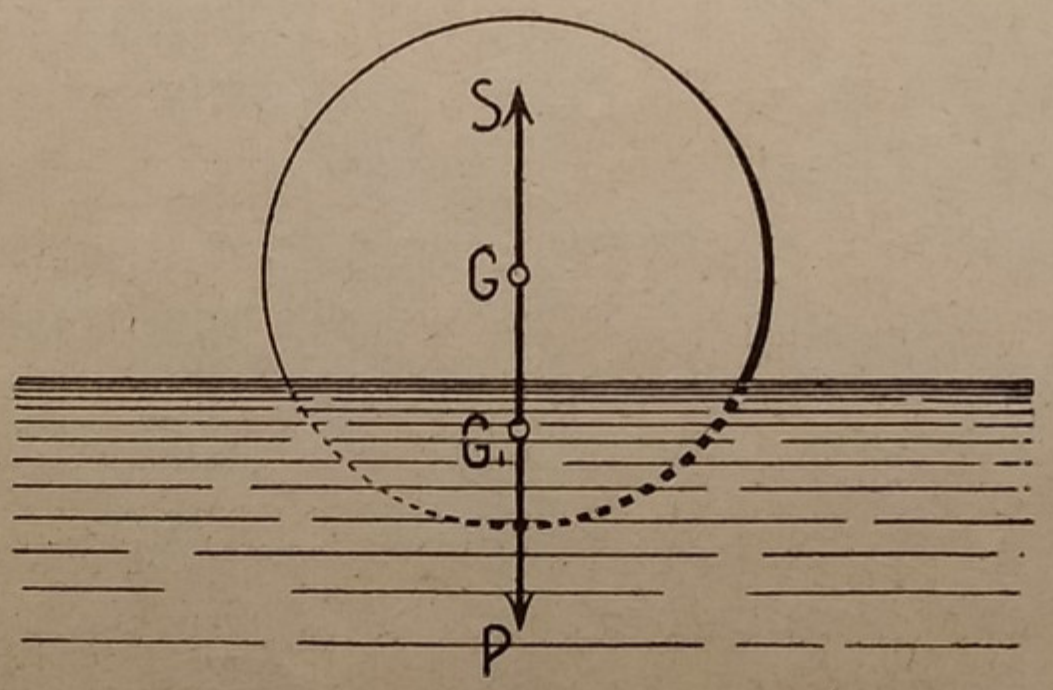

Fig. 143.

di premere la membrana, la figurina ripassa in senso inverso per le condizioni precedenti, perchè l'aria che è stata compressa nella prima operazione, espandendosi, spinge fuori l'acqua e il corpo, diminuito di peso, risale verso la superficie.

Per l'*equilibrio* di un galleggiante si richiede dunque: 1° *che il centro di gravità del corpo e il centro di spinta sieno sulla stessa verticale;* 2° *che il peso del corpo sia eguale al peso del liquido spostato dalla parte immersa.*

Ma spesso l'equilibrio non è stabile. Se il corpo è omogeneo l'equilibrio è in generale instabile o indifferente. Una sfera di sughero (fig. 143) galleggia sull'acqua immergendovisi per circa un quarto del suo volume. G e G_1 sono i centri di gravità e di spinta e le forze agenti, il peso GP e la spinta G_1S, si fanno equilibrio per qualunque posizione della sfera;

questa è dunque in equilibrio indifferente. Se invece si considera un bastone cilindrico omogeneo A di legno dolce (figura 144) tenuto momentaneamente verticale, esso si immerge nell'acqua fino a metà. In tal posizione le forze GP e G_1S costituiscono un sistema equilibrato bensì, ma l'equilibrio è instabile; infatti inclinando il bastone, portandolo nella posizione B, le forze GP e G_1S costituiscono una coppia che fa coricare il bastone sull'acqua. È facile poi capire che in questa posizione è in equilibrio indifferente.

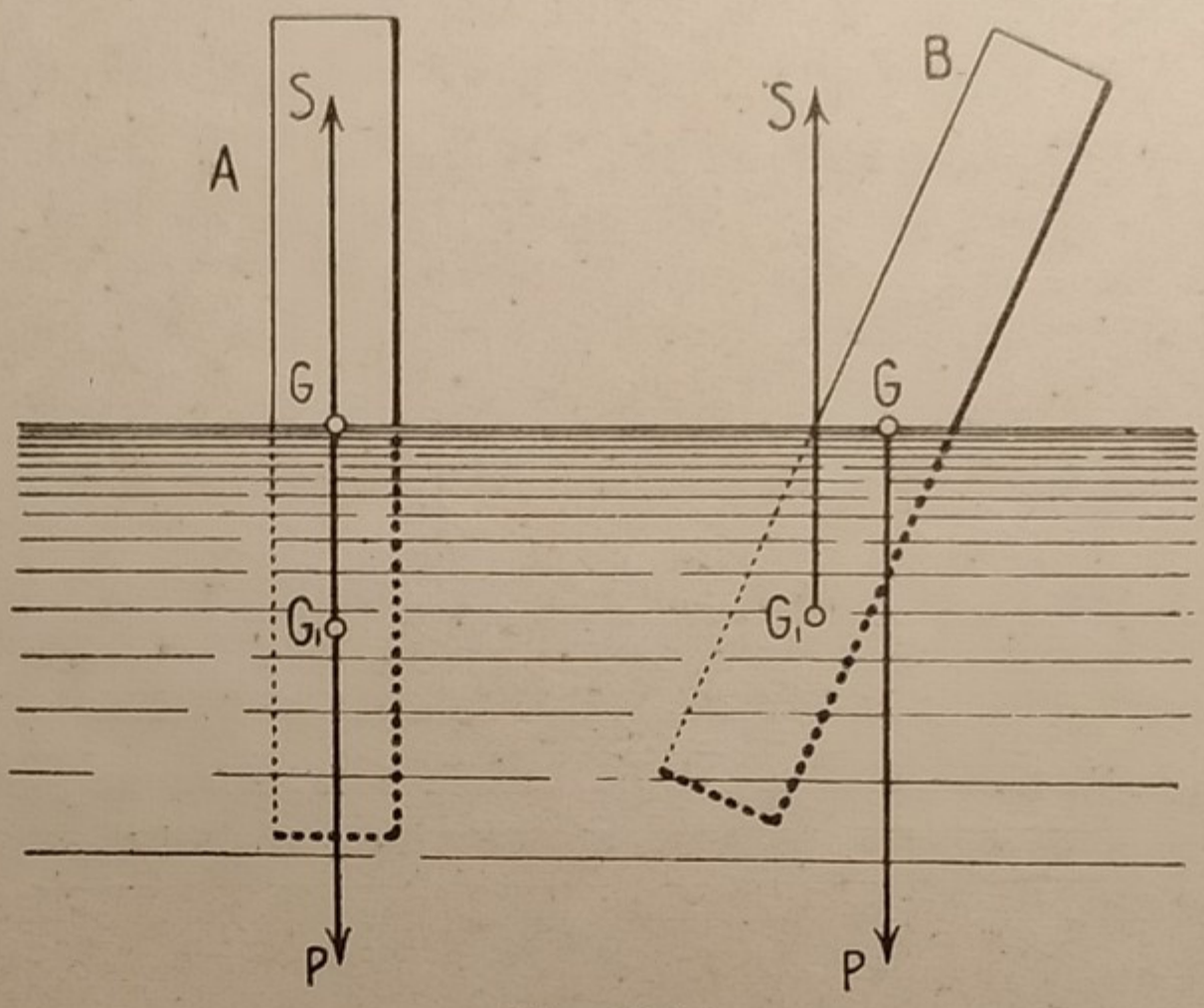

Fig. 144.

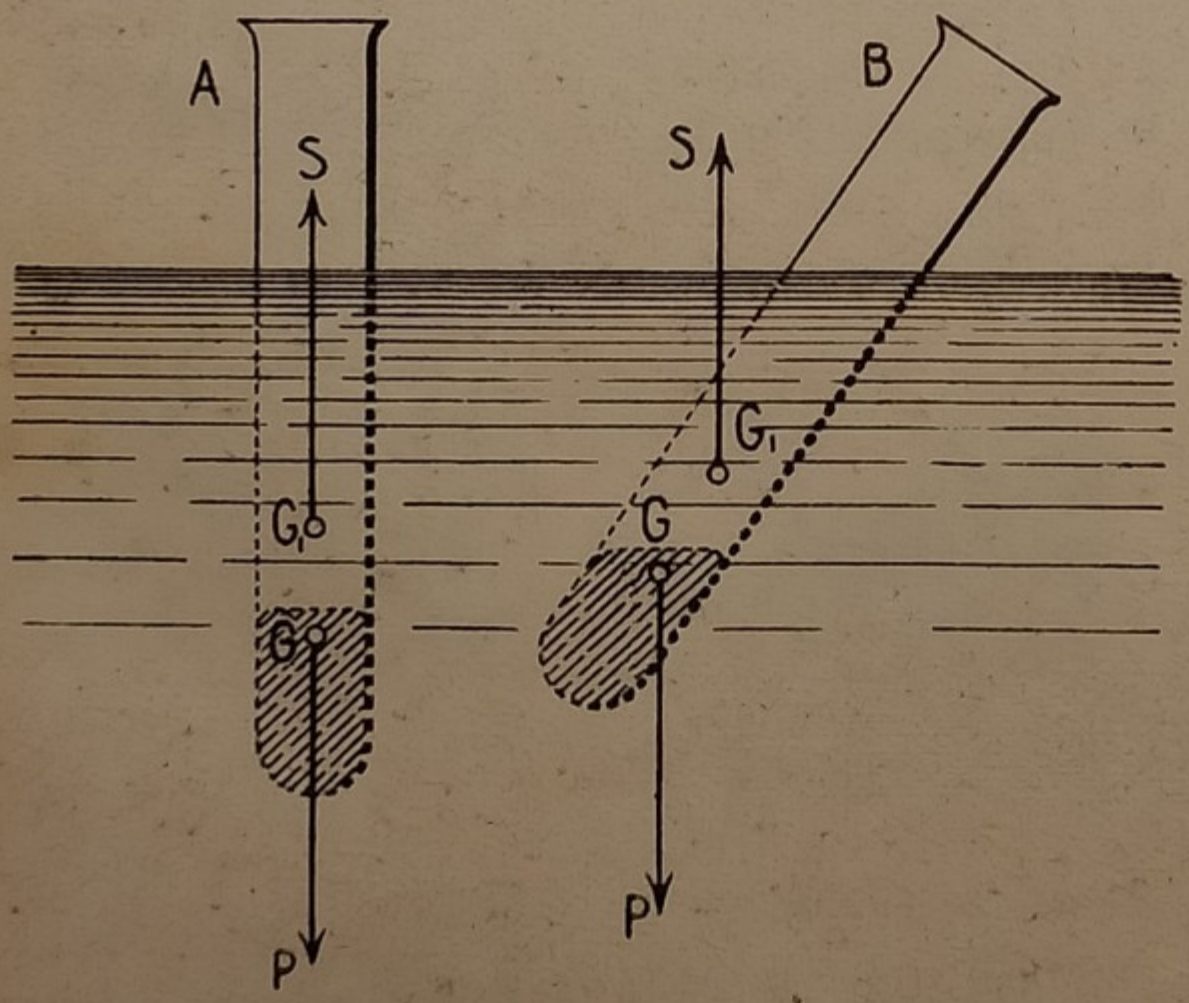

Fig. 145.

Se il corpo galleggiante non fosse omogeneo, come è il caso di una lunga provetta di vetro contenente una certa quantità di mercurio o di pallini di piombo (fig. 145), l'equilibrio può risultare stabile anche per la posizione verticale A della provetta, purchè, quando è inclinata come in B, la coppia di forze

peso-spinta, per causa di un conveniente abbassamento del centro di gravità dovuto alla *zavorra*, agisca per riportare il galleggiante nella posizione verticale.

Ma anche un galleggiante omogeneo può essere in equilibrio stabile, purchè abbia tal forma che inclinandolo, in causa ad un notevole cambiamento di forma del liquido spostato, la

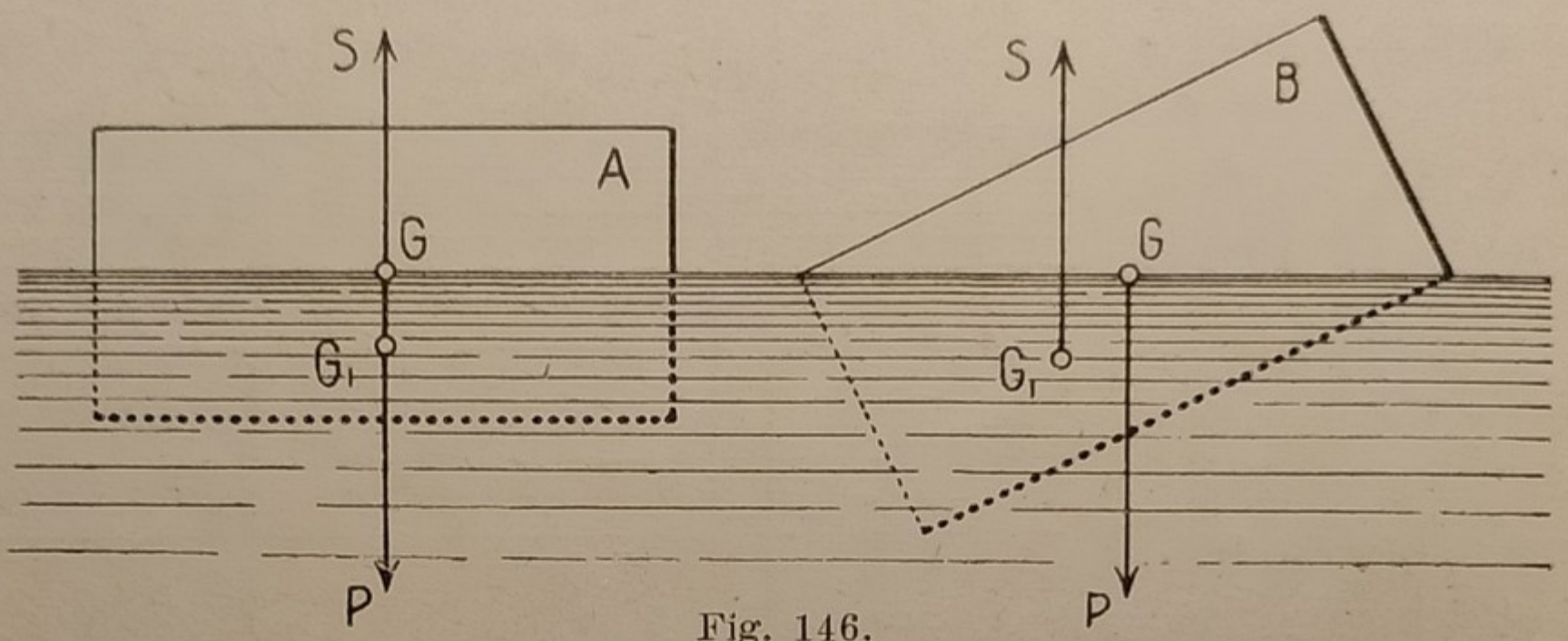

Fig. 146.

coppia peso-spinta agisca per farlo tornare nella posizione primitiva.

Tale è il caso di una rotella di legno dolce (fig. 146) di peso specifico 0,5, nella quale lo spessore sia piuttosto piccolo rispetto al diametro. Essa, quando galleggia in riposo, mantiene la posizione *A*; quando viene inclinata, come è in *B*, è sempre per metà sommersa, e il suo centro di gravità *G* si trova sempre all'altezza della superficie libera dell'acqua, cioè al di sopra del centro di spinta; ma la forma del liquido spostato è tale che il centro di spinta si sposta dalla parte verso cui il galleggiante è inclinato, sì che la coppia peso-spinta agisce per riportarlo nella posizione primitiva.

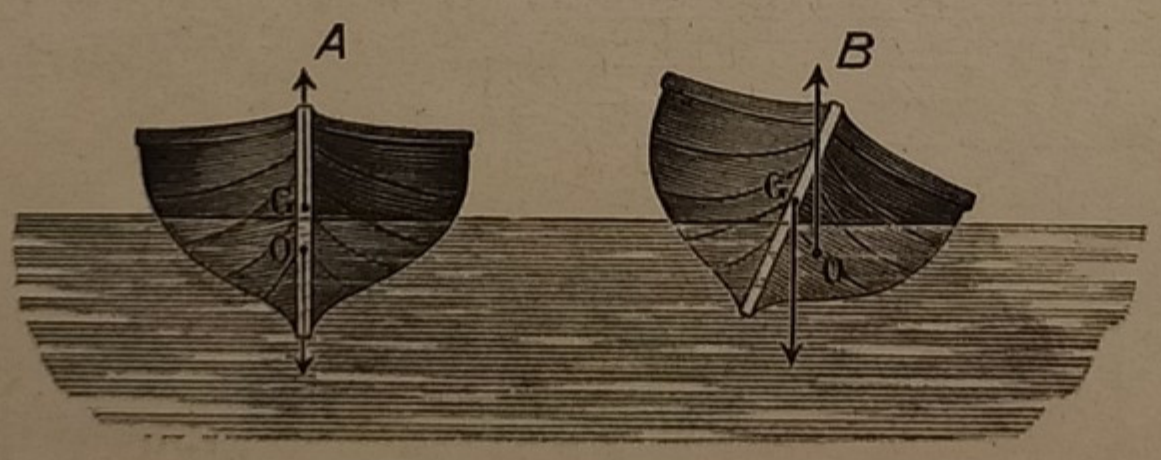

Fig. 147.

Nelle stesse condizioni si trova una barca (fig. 147). A sinistra apparisce in posizione normale, nella quale le due forze peso e spinta applicate rispettivamente nei punti *G* e *O* si fanno

equilibrio. A destra la barca è raffigurata inclinata, dove apparisce che la coppia peso-spinta tende a riportarla nella posizione normale.

43. Navi e battelli sommergibili. — Le *navi* sono galleggianti di grande importanza. Esse, oltre a galleggiare, possono spostarsi alla superficie delle acque con velocità notevoli. Il loro moto si ottiene oggi per effetto del moto rotatorio che adatti motori — macchine a vapore, motori elettrici, a

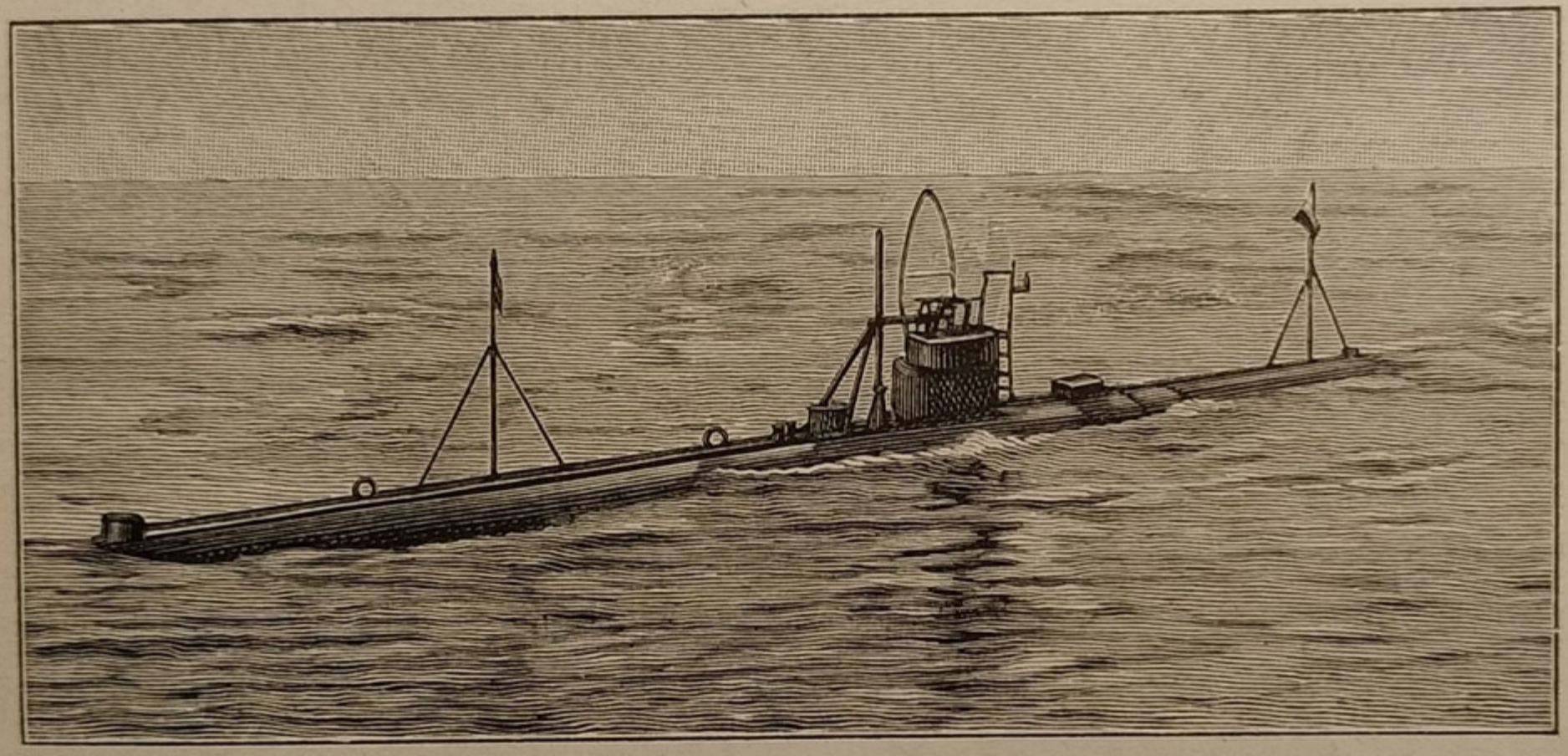

Fig. 148.

scoppio, ecc. — imprimono ad una o più eliche ad asse orizzontale, poste di solito nella parte posteriore della nave.

I *sommergibili* (fig. 148) sono navi particolari che possono navigare sia sopra che sotto l'acqua. Il sommergibile può navigare o alla superficie dell'acqua come una nave ordinaria, o più o meno immerso sì da avere sporgente la torretta di comando, dai finestrini della quale il comandante può esaminare l'orizzonte. Può anche immergersi maggiormente tanto da lasciare sporgente appena l'estremità superiore del *periscopio*, che è un tubo con lenti e prismi atto a trasmettere all'occhio dell'osservatore, che sta nel sommergibile, il panorama dell'orizzonte.

Può infine navigare completamente sommerso ad una profondità maggiore dell'altezza del *periscopio*; in tal caso il sommergibile si trova nelle condizioni di una nave ordinaria

immersa in una fitta nebbia, e non ha altro mezzo di direzione che la bussola.

La figura 148 riproduce un sommergibile in navigazione sopracquea.

Qualunque tipo di sommergibile è costituito di due scafi, l'uno dentro l'altro (fig. 149). L'interspazio *W W* fra i due scafi forma il serbatoio per la zavorra d'acqua; ma tale serbatoio è pieno di aria quando il battello naviga alla superficie (fig. 150, *A*). Facendo invadere più o meno dall'acqua tale serbatoio (fig. 147 *B*, *C*), per l'aumento di peso, il sommergibile si affonda più o meno; ma anche quando il serbatoio sia tutto occupato dall'acqua, la spinta supera sempre il peso per lo meno del 25 % e in certi casi anche del 45 %. Per tal ragione se il battello immerso viene abbandonato a sè stesso, ha sempre una tendenza a risalire alla superficie. Perciò l'immersione è

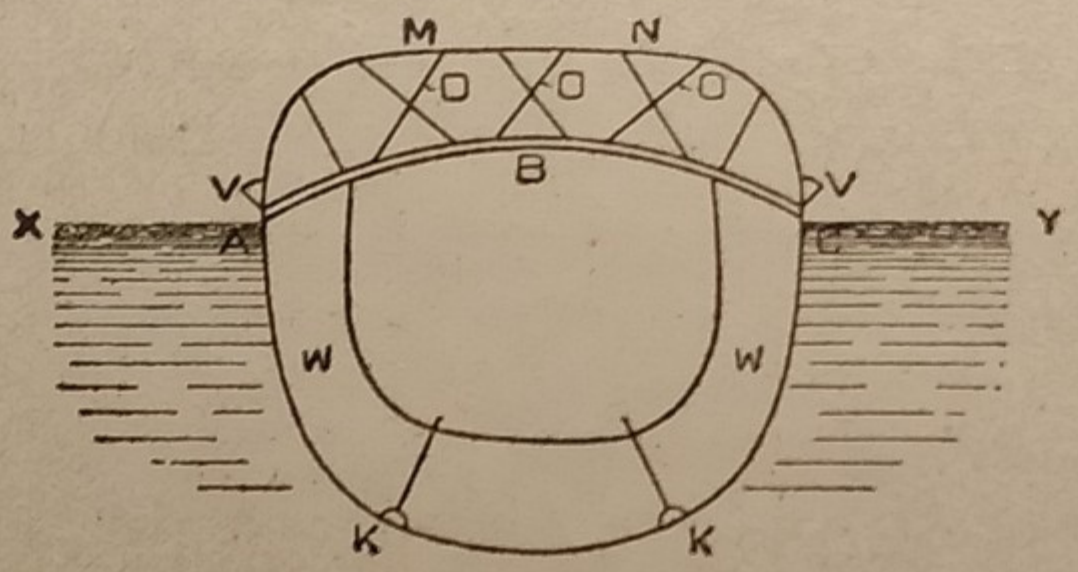

Fig. 149.

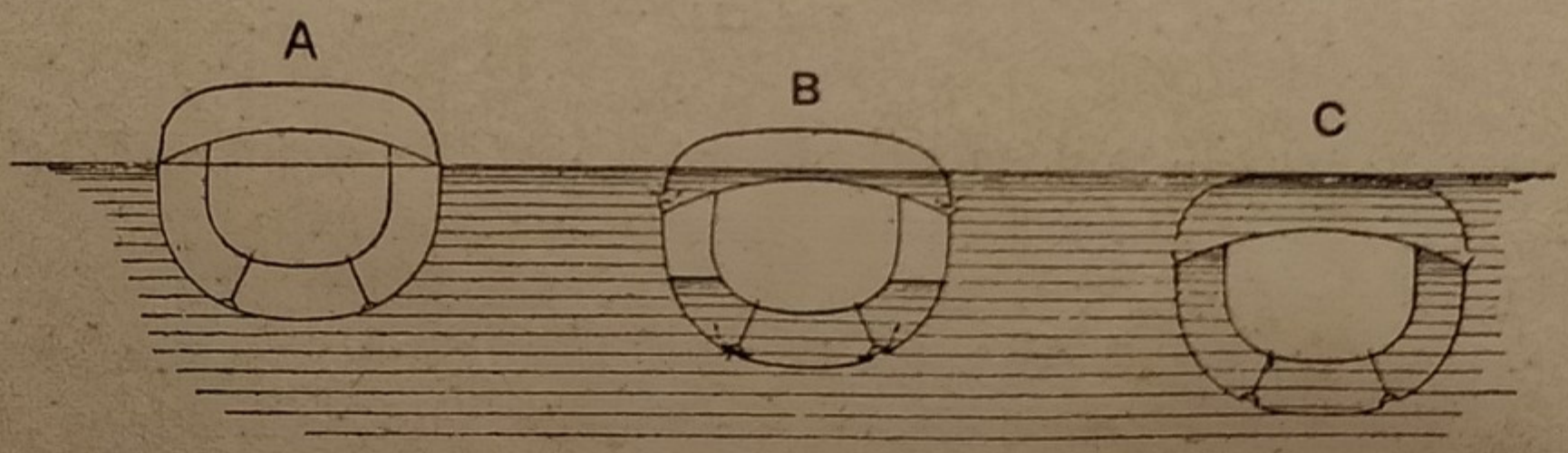

Fig. 150.

ottenuta meccanicamente. A tale scopo il sommergibile porta dei timoni, detti *timoni di profondità*, girevoli attorno ad un asse orizzontale, variando l'inclinazione dei quali, si riesce ad inclinare a piacimento l'asse del sommergibile nella stessa maniera che in una nave ordinaria, col solito timone girevole intorno a un asse verticale, se ne può variare a piacimento la direzione di rotta.

Applicazioni dei principî dell'idrostatica per la misura della densità.

44. Densità e peso specifico. — Densità *assoluta d* di un corpo *è il rapporto fra la sua massa M e il suo volume V:*

$$d = \frac{M}{V} . \qquad (1)$$

Peso specifico *assoluto p è il rapporto fra il peso P del corpo e il suo volume V:*

$$p = \frac{P}{V} . \qquad (2)$$

A rigore, seguendo le convenzioni stabilite nella meccanica, la massa M, il peso P e il volume V del corpo vanno misurati rispettivamente in grammi-massa, in dine e in centimetri cubi.

Ma di solito peso e massa di un corpo si ritengono eguali e allora la densità di un corpo e il suo peso specifico coincidono; perciò indifferentemente si dice che 13,6 è la densità e anche il peso specifico del mercurio.

Nella scienza e anche nelle applicazioni, si parla di densità *relativa* e di peso specifico *relativo*. Essi sono il rapporto fra la massa o il peso del corpo e la massa o il peso di un pari volume di un altro corpo che si prende convenzionalmente come termine di confronto. Per i corpi solidi e liquidi il corpo di riferimento è l'acqua, per i gas l'aria o l'idrogeno. Si noti allora che la densità o il peso specifico assoluti di un corpo coincidono con le rispettive grandezze relative all'acqua, dappoichè 1^{cm^3} d'acqua contenendo 1 grammo-massa d'acqua, il numero che misura il volume di un corpo in cm^3 misura anche la massa in grammi-massa di un pari volume d'acqua.

La misura d'una densità richiede adunque la conoscenza della massa del corpo, che potremo avere con la bilancia, e del volume del corpo. La misura del volume di un corpo solido è l'operazione più importante, trattandosi quasi sempre di corpi di forma

irregolare. Un metodo eccellente è quello della *boccetta* o *picnometro*. La forma adatta particolarmente per i solidi è una piccola boccia chiusa da un turacciolo smerigliato cavo che porta un cannello attorno al quale è tracciato un segno, detto *segno* o *punto di riferimento* (fig. 151).

La boccetta viene riempita d'acqua distillata, che si fa arrivare esattamente fino al punto di riferimento. Ben asciugata, la si colloca sopra il piatto della bilancia, e vicino ad essa si pone un frammento del corpo. Si fa la tara della boccetta e del corpo; si leva poi il corpo e lo si sostituisce con M grammi. M è la massa del corpo.

Fig. 151.

I pesi campioni e la boccetta vengono tolti via, e si introduce il corpo nella boccetta, avendo cura di eliminare le bollicine d'aria che il corpo tiene aderenti. Si regola ancora la quantità d'acqua finchè arrivi al punto di riferimento, si asciuga la boccetta e la si ripone sul piatto della bilancia.

Siccome è uscito un volume d'acqua eguale al volume del corpo, si dovranno porre M' grammi vicino alla boccetta per riavere l'equilibrio. M' misura la massa dell'acqua spostata dal corpo e per conseguenza il volume del corpo stesso, ammesso che la temperatura dell'acqua sia di 4° C.

La densità d del corpo sarà dunque:

$$d = \frac{M}{M'} .$$

Fig. 152.

La boccetta per i *liquidi* è formata di un corpo principale, di un cannello sottile su cui è tracciato il punto di riferimento e di una specie di imbuto superiore chiuso da uno dei soliti tappi smerigliati (fig. 152).

Si pesa la boccetta vuota e la si ripesa, dopo averla riempita del liquido fino al segno tracciato sul cannello; si deduce così

per differenza la massa del liquido. Poscia la si riempie d'acqua fino allo stesso punto, e si ottiene, ancora per differenza con la prima pesata, la massa di un egual volume di acqua. Dividendo fra loro i due numeri, si avrà la densità cercata.

In certi casi, particolarmente quando si tratta di un corpo solido di dimensioni rilevanti e non lo si può spezzare in modo da procurarsi dei frammenti che possano introdursi nella boccetta, si adopera il *metodo della bilancia idrostatica*. Il corpo viene sospeso mediante un sottil filo sotto uno dei piatti della bilancia idrostatica (41), e fattane la tara, lo s'immerge nell'acqua distillata. Gli M' grammi che si devono porre sul piattello che sostiene il corpo, per ottenere l'equilibrio, misurano, per il principio di Archimede, la spinta subìta dal corpo, ovverosia la massa dell'acqua spostata, cioè il volume del corpo in centimetri cubi. In seguito staccato il corpo, lasciando a posto il filo di sospensione e tolti i pesi M', si ristabilisce l'equilibrio con un adatto numero M di grammi campioni. M è perciò la massa del corpo e per conseguenza la densità cercata si avrà dal rapporto $M : M'$.

Per i *liquidi*, si sospende al disotto di uno dei piatti della bilancia idrostatica, mediante un filo di platino, una bolla di vetro zavorrata con mercurio o pallini di piombo e se ne fa la tara. Tale bolla viene immersa completamente nel liquido, e si ristabilisce l'equilibrio con un peso M, che rappresenta la spinta, ossia la massa del liquido spostato in grammi.

Nella stessa maniera si ottiene la massa in grammi M' dell'acqua spostata dalla stessa bolla, e il rapporto $M : M'$ misura la densità cercata.

Un altro metodo molto spiccio, usato particolarmente per bisogni commerciali e industriali, anche se non dà risultati molto rigorosi, è quello degli *areometri a peso costante*. Essi sono dei galleggianti tutti in vetro, formati di un tubo cilindrico, zavorrato in modo da mantenersi verticali nei liquidi. A tale scopo portano una grossa bolla di vetro in basso piena d'aria, che conferisce all'apparecchio la leggerezza sufficiente per galleggiare, seguìta da una bolla più piccola zavorrata con mercurio o pallini di piombo affinchè l'apparecchio galleggi stabilmente in posizione verticale (42). Il peso del liquido spostato

è sempre eguale al peso del galleggiante, perciò questo deve spostare un maggior volume del liquido meno denso, cioè deve affondarvisi di più.

Tali areometri per semplice lettura possono anche indicare la densità del liquido, ma più spesso ne indicano il grado di concentrazione, che talvolta è in relazione col prezzo del liquido.

Descriviamo i più usati.

Il *pesa-acidi* Baumé (fig. 153, *A*), che serve per i liquidi *più densi* dell'acqua, è zavorrato in modo che nell'acqua pura il punto di affioramento, segnato con 0, è situato verso *l'alto* del cannello. L'apparecchio viene posto in seguito in una soluzione di 85 parti in peso d'acqua e 15 di sal marino; nel punto di affioramento che sta sotto quello dell'acqua, si segna 15. L'intervallo da 0 a 15 viene diviso in 15 parti eguali, e la graduazione viene prolungata fino al basso. Il cannello è abbastanza lungo da portare 70 divisioni. Lo strumento segna 66° nell'acido solforico concentrato.

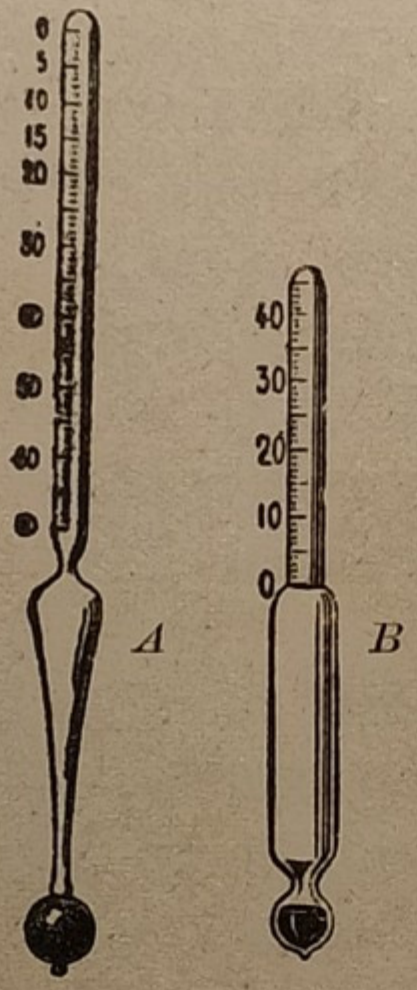

Fig. 153.

Il *pesa-spiriti* Baumé (fig. 153, *B*), impiegato per i liquidi *meno densi* dell'acqua, è zavorrato in modo da immergersi fino ad un punto che sta vicino all'estremità inferiore del cannello, in una soluzione di 90 parti in peso d'acqua e 10 di sal marino. Al punto di affioramento si segna 0. Nell'acqua pura s'affonda di più, e si segna 10 al punto di affioramento. Si divide l'intervallo in 10 parti eguali, e si prolunga la graduazione fino alla sommità del cannello. Lo strumento segna 66° nell'etere del commercio, 47°,5 nell'alcool assoluto.

Per convenzione stabilita, la graduazione dei due areometri va fatta mantenendo i liquidi descritti alla temperatura di 12°.

L'*alcoolometro centesimale* di Gay-Lussac è costruito per conoscere direttamente il *volume* di *alcool puro* che contengono 100 volumi d'una miscela di alcool ed acqua. È zavorrato in modo che nell'acqua pura il punto di affioramento è verso il

basso del cannello, dove è segnato 0 (fig. 154). Per farne la graduazione si versano in una serie di provette graduate 5, 10, 15 . . . 95 volumi di alcool puro; e si completa in tutte il volume 100 con l'aggiunta di quantità conveniente d'acqua.

Si immerge l'areometro nelle successive provette, e si segna 5 nel punto di affioramento nella prima miscela, 10 nella seconda, ecc., 100 nell'alcool puro. Le divisioni principali così ottenute non sono equidistanti; tali divisioni vanno perciò divise ciascuna in 5 parti che per conseguenza non saranno eguali, ma verranno fatte con adatti proce-

dimenti che qui non esponiamo. In tal modo fra lo 0 e il 100 abbiamo 100 divisioni; e così se l'areometro immerso nello spirito del commercio segna 92, significa che su 100 cm^3 di tal liquido 92 sono di alcool puro.

Ed è appunto tale grandezza che importa conoscere sia nel commercio, e sia in relazione alla imposta fiscale sulla fabbricazione dell'alcool. In questo caso la tassa è fissata in lire per ogni *ettanidro*, cioè a dire per ogni *ettolitro* di alcool *anidro*, ossia puro; di guisa che se la tassa fosse di L. 100 per *ettanidro*, una fabbrica che producesse alcool al 90% pagherebbe, per ogni ettolitro di tale alcool, L. 90.

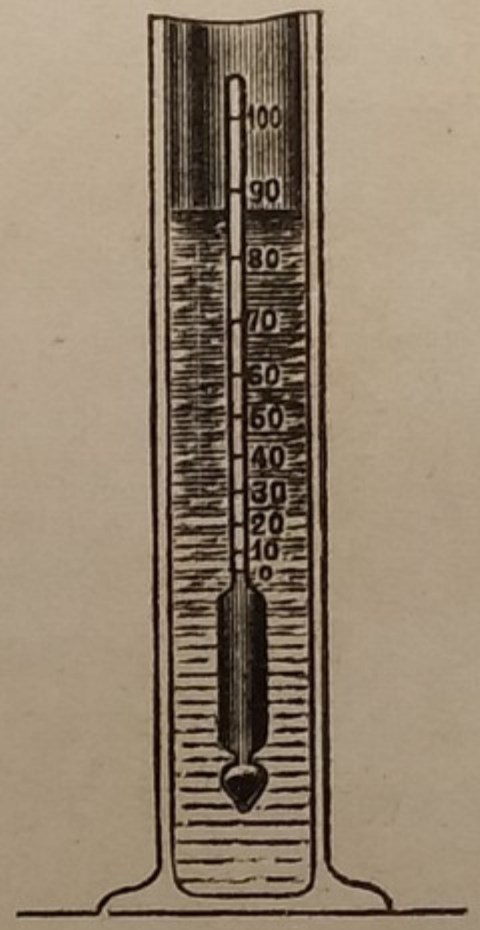

Fig. 154.

Le indicazioni dell'alcoolometro si riferiscono alla temperatura convenzionale di 15°; le osservazioni fatte a temperatura differente da questa vanno corrette col mezzo di tavole dovute al Gay-Lussac stesso.

Risulta ancora, da quanto si è spiegato, che l'alcoolometro può servire solo pei miscugli di alcool ed acqua; se si volesse conoscere la quantità di alcool contenuto in un liquido, come il vino, il quale contiene, oltre l'acqua e l'alcool, sostanze diverse, bisogna sottoporlo alla distillazione, la quale fornisce la totalità dell'alcool mescolato con una quantità variabile di acqua. In tal caso presi 100 cm^3 di vino lo si distilla fino a ottenere circa 35 cm^3 di liquido distillato; a questo punto il liquido distillato contiene tutto l'alcool che c'era nel vino. Al

liquido distillato si aggiunge dell'acqua fino a portare il volume a 100 cm^3 e il grado alcoolico di quest'ultima soluzione sarà quello del vino che si esamina.

Il *densimetro* è anche un areometro, che dà direttamente la densità. La graduazione vien fatta preparando prima delle soluzioni aventi densità 1, 1,1, 1,2, 1,3 . . . 2; 0,9, 0,8, 0,7, 0,6 e nei punti di affioramento si segnano rispettivamente questi numeri.

Notisi infine che gli areometri ci forniscono più o meno le densità dei liquidi, ma non ci dànno cognizione della natura del liquido: una verifica areometrica è dunque assolutamente illusoria, dal punto di vista della purezza del prodotto, allorquando sia possibile comporre la densità normale di questo, coll'introduzione di sostanze diverse. Così sarebbe assurdo esigere di conoscere la purezza del latte col *lattodensimetro* che è in sostanza un densimetro con graduazione che va da 1,000 a 1,050.

Un latte normale segna al lattodensimetro da 1,028 a 1,034, ma la stessa densità si può comporre *sottraendo* della *crema* al latte, operazione che ne aumenta la densità, e *aggiungendo* una conveniente quantità d'*acqua* che produce l'effetto inverso.

45. Densità delle sostanze più comuni.

CORPI SEMPLICI

Alluminio	a 20°	2,70
Argento	»	10,503
Diamante	—	3,52
Rame	a 20°	8,93
Ferro	—	7,96
Magnesio	a 5°	1,74
Nickel	a 15°	8,8
Oro	a 20°	19,268
Platino	—	21,4
Potassio	a 13°	0,875
Sodio	a 13°	0,972
Zinco	a 22°	7,127

LIQUIDI

Mercurio	a 0°	13,59552
Acido solforico	a 15°	1,842
Alcool etilico	»	0,7936
Benzolo	»	0,8842
Cloroformio	»	1,4963
Etere etilico	»	0,7191
Glicerina	»	1,2625
Solfuro di carbonio	»	1,2706
Toluene	»	0,8705
Olio di oliva	»	0,915-0,9182
Olio di cotone	»	0,923-0,925
Olio di arachide	»	0,916-0,920

Meccanica dei gas.

46. Proprietà principali dei gas. — I gas sono fluidi *espandibili*, *compressibili* ed *elastici*; ciò è stato dimostrato al § 3. Per effetto della sua espandibilità, un gas riempie sempre tutto il vaso che lo racchiude, in luogo di occuparne solamente la parte inferiore, come fa un liquido, sicchè un gas non ha una superficie libera.

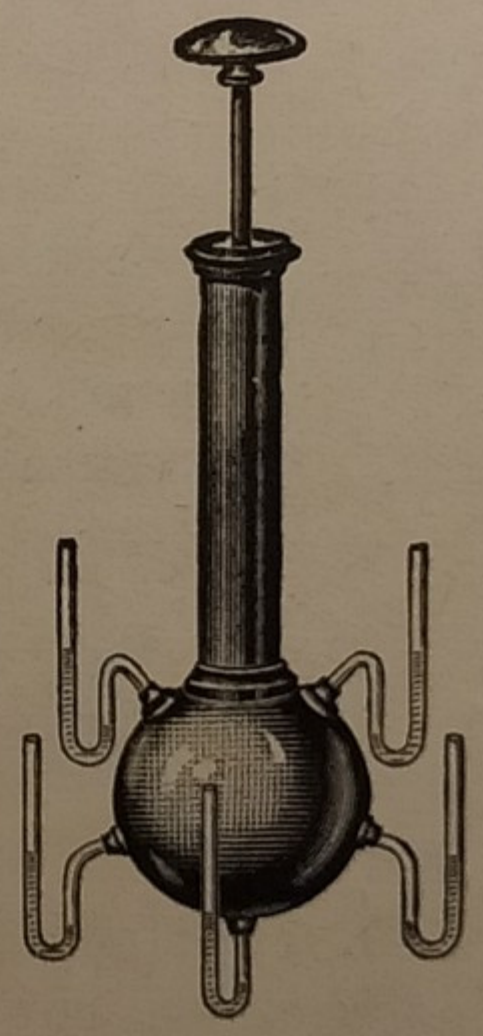

Fig. 155.

Il *principio di Pascal* si applica ai gas come si può verificare coll'apparecchio della figura 155. Un pallone di vetro pieno d'aria porta un tubo cilindrico in cui può scorrere uno stantuffo a perfetta tenuta ed è munito di orifizi in varî punti, ai quali sono applicati altrettanti tubi ad **U**, contenenti dell'acqua colorata o mercurio.

Comprimendo il gas, in ciascun tubo si verifica la stessa differenza di livello.

Così come nel caso dei liquidi intenderemo per *pressione di un gas* la forza con cui esso preme sopra 1 cm^2 di superficie delle pareti del recipiente.

Fu Galileo il primo a dimostrare che *l'aria è pesante*, contro le affermazioni della scuola aristotelica. Per fare l'esperienza,

si sospende sotto uno dei piatti della bilancia un grande pallone di vetro (fig. 156), pieno d'aria, munito di robinetto, e se ne fa la tara.

Fig. 156.

Fatto il vuoto nel pallone e rimessolo sulla bilancia, il giogo s'inclina dalla parte della tara. Per riavere l'equilibrio si devono aggiungere dalla parte del pallone alcuni grammi che sostituiscono il gas estratto; per l'aria occorre poco più di un grammo per ogni litro di capacità del pallone. Il fisico Régnault, nel 1860 a Parigi, trovò che un *litro d'aria pura e secca nelle condizioni normali*, cioè alla temperatura di 0° e alla pressione di kg. 1,033 per centimetro quadrato, pesa gr. 1,293, vale a dire circa $\frac{1}{773}$ dell'acqua.

Nel § 44 abbiamo detto che la densità dei gas va riferita all'aria o all'idrogeno; la seguente tabella riporta la massa di un litro di alcuni aeriformi nelle condizioni normali, e la densità rispetto all'aria.

	Massa di un litro in grammi	Densità relativa all'aria
Aria secca	1,29284	1
Ossigeno	1,4290	1,10535
Azoto	1,2507	0,96737
Idrogeno	0,08987	0,0695
Cloro	3,214	2,491
Anidride carbonica	1,9768	1,5291
Elio	0,1778	0,1375
Metano	0,7168	0,5544

47. Pressione atmosferica e suoi effetti. — L'*atmosfera* è la massa d'aria che avvolge la Terra per uno spessore non determinato; essa, per effetto della gravità, rimane unita alla Terra e la segue nei suoi movimenti di rotazione e di traslazione. L'atmosfera non è omogenea, il peso degli strati superiori comprime gli strati inferiori, per cui la densità cresce via via che ci si avvicina al suolo. Ed è in grazia del peso dell'aria che la

superficie della Terra può essere considerata come il fondo di un vaso (39), e per effetto del principio di Pascal, applicabile anche agli aeriformi (37), i corpi immersi nell'aria sono premuti su ogni punto della loro superficie da una forza, che è normale alla superficie stessa. Ma nel caso di un corpo immerso nell'aria, la forza F da cui è premuta una porzione S della superficie, non può calcolarsi colla formola $F = Shp$ (39), perchè non si conosce nè l'altezza dell'atmosfera, nè la legge esatta con cui la densità dell'aria diminuisce coll'altezza. Ma tale forza si può valutare per mezzo della seguente esperienza di Torricelli.

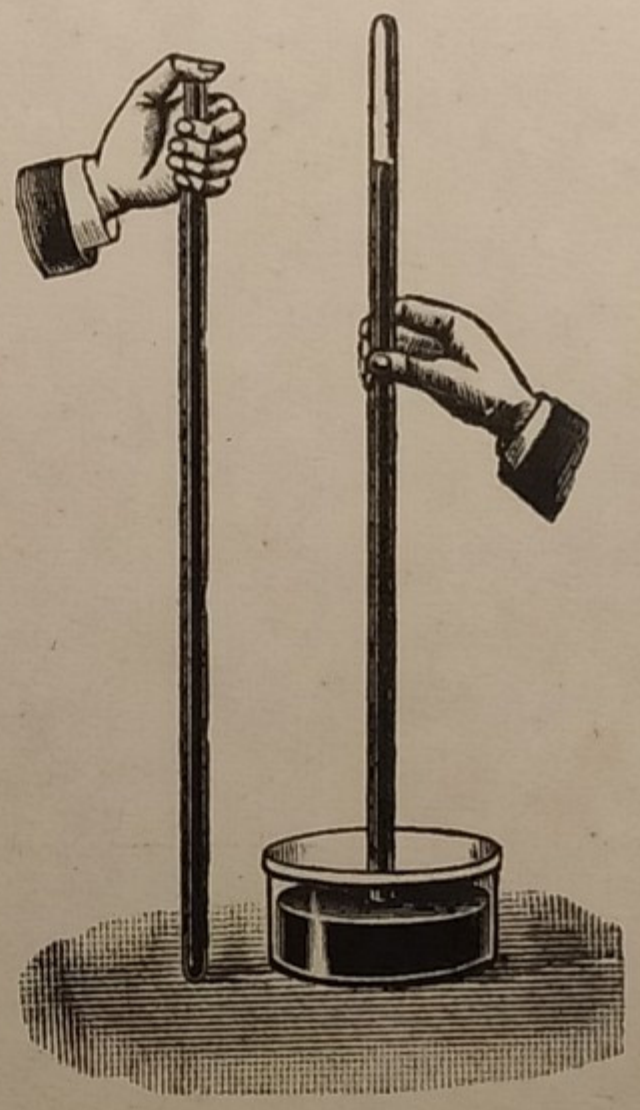

Fig. 157.

Una canna di vetro, lunga circa un metro, chiusa ad un estremo, viene riempita di mercurio, avendo cura che la canna e il mercurio sieno ben puliti ed asciutti, e che non restino bollicine d'aria aderenti alle pareti; poi la si capovolge, tenendola chiusa inferiormente col dito, su di una vaschetta piena di mercurio. Liberando l'orifizio inferiore (fig. 157), si constata che una parte del mercurio esce dalla canna, ma il liquido si ferma in questa a una certa altezza. Se l'esperienza viene fatta al livello del mare, il dislivello fra le superficie libere del mercurio nella vaschetta e nella canna è in media di 76 cm.

Tale apparecchio viene detto *barometro*. Nella parte superiore della canna, abbandonata dal mercurio, detta *camera barometrica*, si ha il *vuoto*, detto vuoto *barometrico* o *torricelliano*.

L'altezza a cui si ferma il mercurio nel tubo non dipende nè dal diametro, nè dalla forma, nè dalla inclinazione del tubo AB (fig. 158). La distanza *verticale* BD delle due superficie libere nel tubo e nella vaschetta, si chiama *altezza barometrica*.

È facile interpretare l'esperienza descritta. Nell'apparecchio la massa di mercurio è in equilibrio tanto nel tubo quanto nella

vaschetta, perciò la forza premente deve essere la stessa su due aree eguali *mn* e *m′n′* prese sul piano orizzontale che comprende la superficie libera della vaschetta (fig. 159). Nel tubo l'area *mn* sopporta una forza eguale solo al peso di una colonna di mercurio che ha per base *mn* e per altezza l'altezza del liquido, perchè nella camera barometrica la pressione è zero. Sull'area *m′n′* esterna agisce solo la pressione atmosfe-

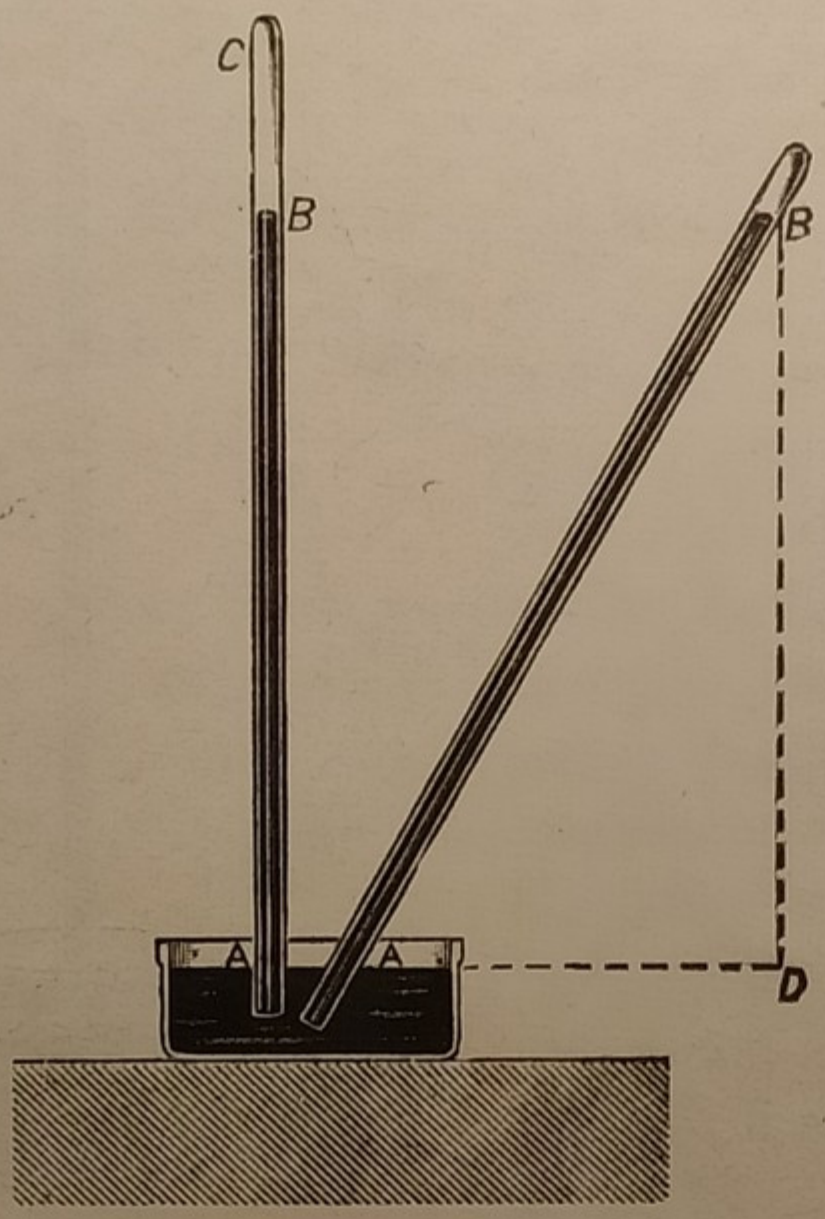

Fig. 158.

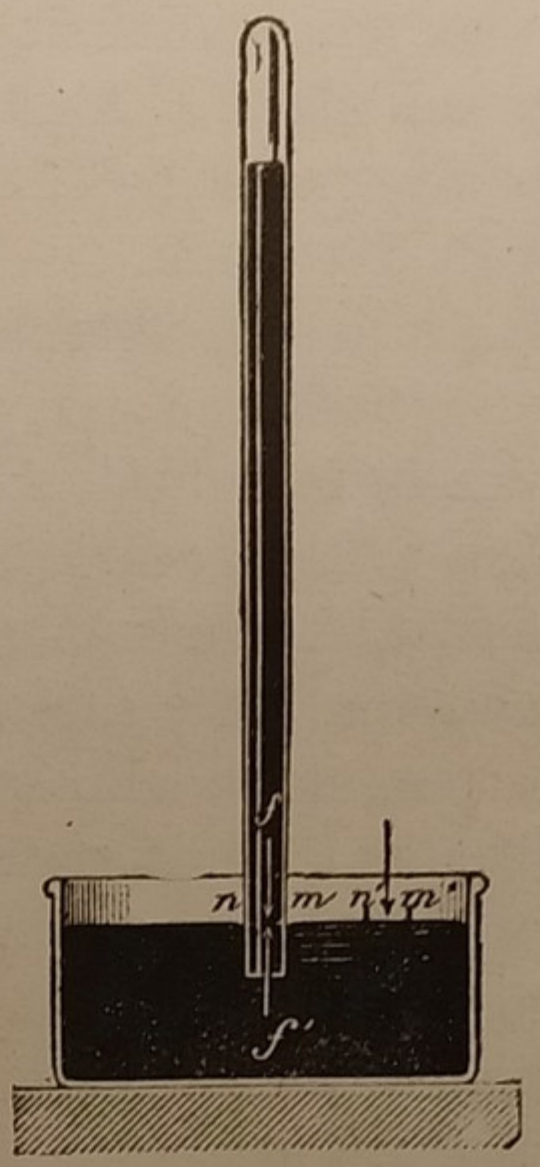

Fig. 159.

rica, perciò questa è misurata da quella, cioè dal peso di una colonna di mercurio che ha per base *mn* e per altezza l'altezza barometrica.

In base a tale semplice ragionamento riesce facile di valutare la forza con cui l'atmosfera agisce sopra un'area di 1 cm^2, isolata sulla superficie di un corpo qualunque immerso nell'aria nel luogo dove si trova il barometro. Posto che l'altezza barometrica sia di 76 cm., per la nota formola $F = Shp$ si ha $F = 1 \times 76 \times 13{,}6 = 1033$ grammi, poichè la densità del mercurio è appunto 13,6 circa.

Tale pressione è anzi presa come *unità* di misura delle pressioni, e la si dice pressione *di una atmosfera* (52).

Sopra un'area di S^{cm^2} l'atmosfera agisce dunque con una forza di $1033S$ grammi; di modo che un liquido qualunque di densità p, per premere sopra tale area con la stessa forza, dovrà avere un'altezza h che soddisfi alla formola $Shp = 10{,}33S$, ossia:

$$h = \frac{1033}{p} \text{ cm.}$$

Per l'acqua, essendo $p = 1$, si ha $h = 1033^{cm}$.

Infine, risulta chiaro che se un barometro viene portato sotto la campana della macchina pneumatica e si estrae l'aria che preme sulla superficie libera del mercurio nella vaschetta, la colonna di mercurio dovrà diminuire di altezza.

Lo stesso avviene se l'apparecchio viene portato in alto. Già il Pascal aveva constatato che in cima alla torre di San Giacomo a Parigi, la colonna di mercurio era di $4^{mm},3$ inferiore che alla base. Poco più tardi, nel 1648, dietro indicazioni dello stesso Pascal, l'esperienza di Torricelli fu eseguita contemporaneamente alla base e alla sommità del Puy-de-Dôme; *la colonna barometrica fu trovata in alto minore che in basso* di 8 centimetri e mezzo. Si vedrà in seguito l'importanza pratica di questo fatto.

La pressione atmosferica che al livello del mare ha il valor medio, tutt'altro che trascurabile, di circa 1 kg. per cm^2, non manifesta d'ordinario effetti sensibili sui corpi, poichè esercitandosi normalmente su ciascun punto della loro superficie, ne risulta semplicemente una *spinta di Archimede* (41), diretta verticalmente dal basso in alto ed eguale al peso dell'aria spostata.

Ma se si diminuisce in qualche modo la forza dovuta alla pressione sopra una parte della superficie del corpo, le forze dovute alla pressione esercitantesi sulla rimanente superficie, non essendo più equilibrate, provocano dei fenomeni che possono assumere una notevole importanza.

Ciò è, ad esempio, dimostrato colle seguenti esperienze. Il *crepavesciche* è una specie di campana di vetro che porta una larga apertura anche in alto. La campana viene poggiata sul piatto della macchina pneumatica, mentre l'apertura supe-

riore viene chiusa legandovi strettamente una foglia di gomma elastica (fig. 160). Dapprincipio la membrana è piana, perchè è tesa e perchè l'aria agisce sulle due faccie con forze eguali ed opposte che si fanno equilibrio; ma se si toglie lentamente l'aria dalla campana, si osserva che col diminuire della pressione interna, la pressione esterna rende via via sempre più concava la faccia esterna della membrana, che può in tal modo assumere la forma di un'ampia borsa. Se si ripete l'esperienza sostituendo la lamina di gomma, con un pezzo di sottile vescica o un foglio di sottile carta impermeabile, la membrana, essendo poco estensibile, ad un certo punto si rompe fragorosamente (fig. 161).

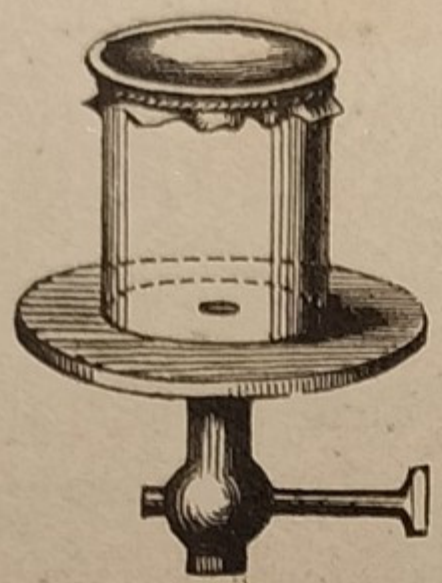

Fig. 160.

Gli *emisferi di Magdeburgo* sono due semisfere cave in ottone di circa 10 cm. di diametro, aventi i bordi lavorati in modo che, semplicemente interponendovi un po' di sevo, costituiscono una sfera cava a perfetta tenuta (fig. 162). Uno dei due emisferi porta un tubo a robinetto che si avvita alla macchina pneumatica, l'altro emisfero

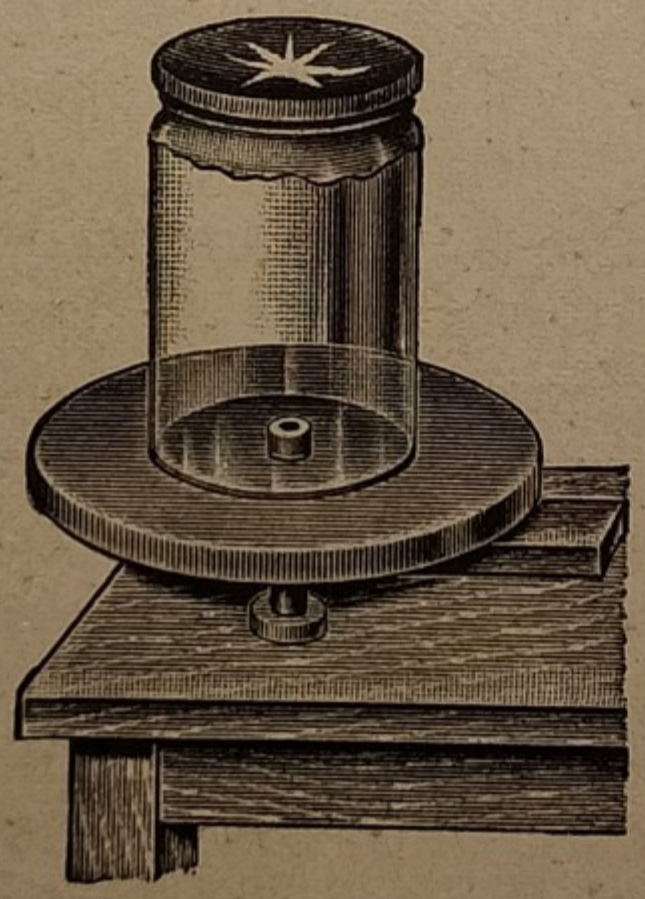

Fig. 161.

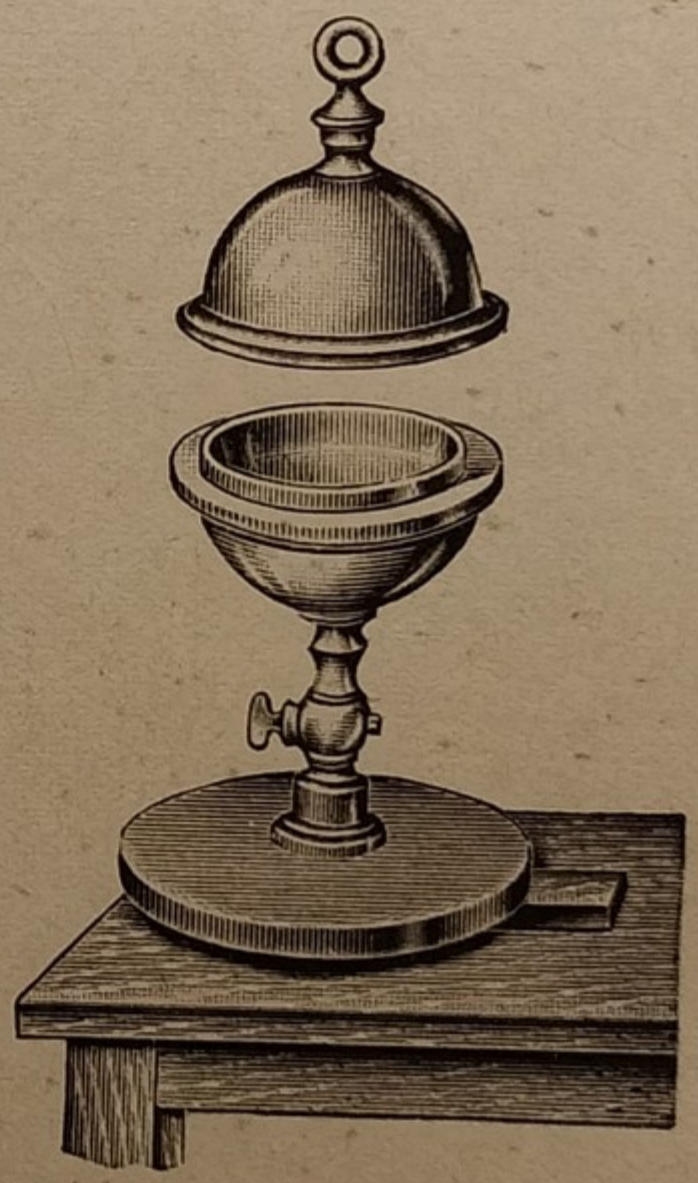

Fig. 162.

porta un anello. Estratta l'aria interna e chiuso il robinetto, occorre una forza rilevante per separare i due emisferi, mantenuti fortemente uniti dalla pressione atmosferica. Si può dimostrare che la forza da vincere in tale esperienza è eguale alla forza con cui l'aria preme normalmente sopra l'area del cerchio massimo dell'apparecchio; talchè per emisferi di 10 cm. di diametro il cerchio massimo ha un'area di 78,54 cm^2, per cui ricordando che la pressione atmosferica equivale a circa 1 kg. per centimetro quadrato, la forza richiesta è di circa kg. 78 ½. Aprendo il robinetto, l'aria entra sibilando, e i due emisferi si separano agevolmente, perchè in tal caso la pressione esterna è equilibrata dalla pressione interna.

Fig. 163.

Altre facili prove si possono dare dell'esistenza della pressione atmosferica. Un bicchiere da tavola, riempito completamente di acqua, viene capovolto dopo averne chiusa l'apertura con un pezzo di carta (fig. 163). La pressione atmosferica impedisce all'acqua di cadere malgrado che il foglio che fa da fondo del vaso, sopporti una discreta pressione da parte del liquido soprastante. E così si spiega il funzionamento della *pipetta* (fig. 164), dall'orifizio inferiore della quale l'acqua non effluisce affatto finchè si tiene chiuso col dito il foro superiore. In questo caso è la sottile membrana liquida, tesa a traverso l'orifizio inferiore, che fa le veci del foglio di carta nell'esperienza del bicchiere capovolto.

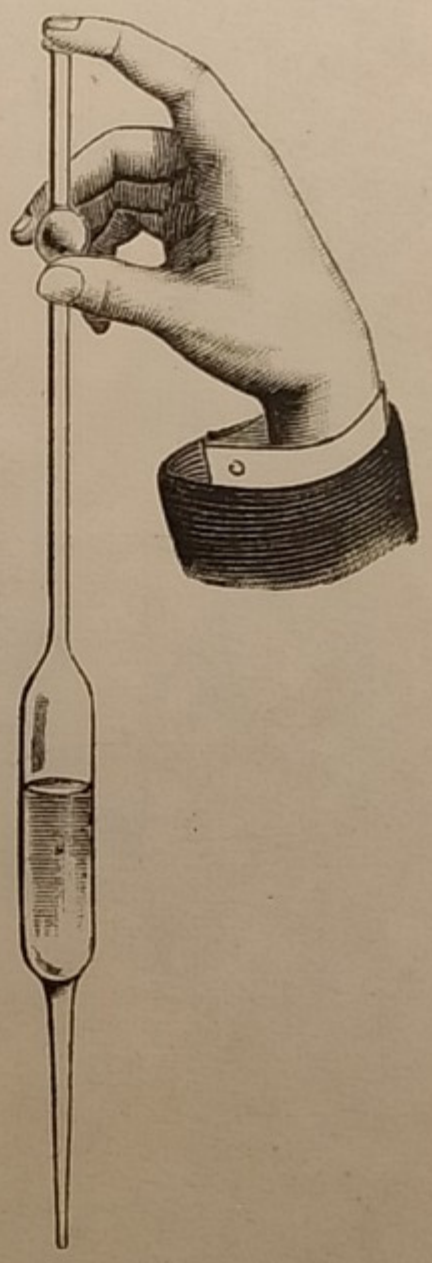

Fig. 164.

48. Principio di Archimede nei gas. — Nel paragrafo che precede abbiamo dichiarato che il principio di Archimede vale anche nei gas; ed ha lo stesso enunciato che gli abbiamo dato

nei liquidi (41), cioè un corpo immerso in un gas sopporta su tutti i punti della sua superficie e normalmente a questa, delle forze, dovute alla pressione del gas, *che dànno luogo a una risultante verticale, detta spinta, diretta dal basso in alto e eguale in grandezza al peso del gas spostato.* Il principio nelle sue linee generali è verificabile col *baroscopio* (fig. 165). Questo apparecchio è in sostanza una piccola bilancia da potersi collocare sotto una campana della macchina pneumatica. Ad una estremità del giogo è sospesa una grande sfera cava, all'altra una piccola sfera massiccia. Nell'aria le due sfere si fanno equilibrio; ciò perchè la sfera maggiore pesa più dell'altra, ma riceve anche per ragione del suo maggior volume una spinta maggiore, tale che l'eccesso della spinta compensa l'eccesso di peso. Rarefacendo l'aria si osserva che il giogo si abbassa dalla parte della sfera maggiore, perchè la differenza delle due spinte *va diminuendo* — nel vuoto tale differenza diventerebbe nulla — e non basta più a compensare l'eccesso di peso delle due sfere, che *rimane costante*. Fatta rientrare l'aria nella campana, il giogo si rimette orizzontale.

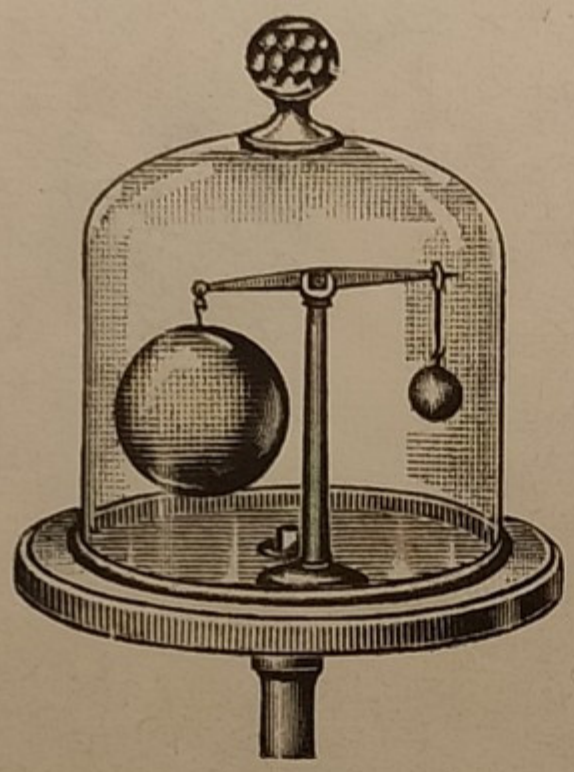

Fig. 165.

Le conseguenze del principio di Archimede applicate ai gas sono dell'ordine di quelle che abbiamo dedotte nei liquidi.

1° Un corpo *più pesante* del gas che sposta, lasciato libero, *cade.*

2° Un corpo *avente lo stesso peso* del gas spostato, si mantiene *sospeso in equilibrio.*

3° Un corpo *meno pesante* del gas spostato, lasciato libero, *s'innalza*, e se è libero nell'atmosfera, sale fino a raggiungere quello strato d'aria per il quale la spinta è eguale al peso. Quest'ultimo fenomeno è presentato dalle nubi, dal fumo e dai palloni aerostatici, di cui si parlerà in seguito.

49. Barometri. — L'altezza barometrica di cui è fatto parola in precedenza, cioè la distanza verticale fra le superficie

libere del mercurio nella vaschetta e nel tubo, varia colla altitudine; oltre a ciò essa subisce, nello stesso luogo, continue variazioni; infatti, in uno stesso luogo si notano spesso variazioni anche di 2 centimetri in più o in meno del valore normale. A tali variazioni sono connessi i più importanti fenomeni meteorologici, cosicchè è molto utile seguirne esattamente e regolarmente l'andamento nei diversi luoghi e nei diversi tempi.

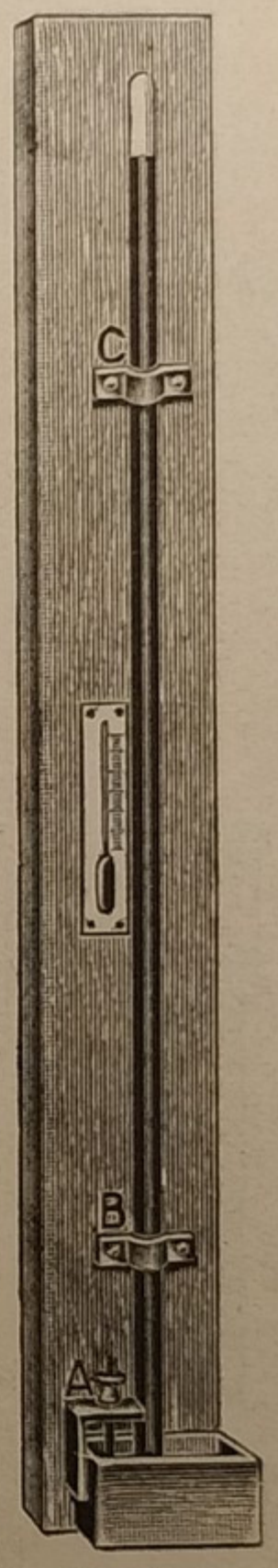

Fig. 166.

Il *barometro da laboratorio* (fig. 166), che chiameremo *barometro normale*, è formato con una canna di vetro avente un diametro di circa 3 cm., perchè la depressione capillare vi sia insensibile.

Una vite *A*, di lunghezza conosciuta, si conduce per ogni osservazione a sfiorare la superficie del mercurio della vaschetta, e si legge con un adatto apparecchio la differenza di livello fra la punta superiore della vite e il menisco del mercurio nella canna. L'altezza barometrica si ha aggiungendo a tale differenza la distanza fra le due punte della vite. Ma il mercurio diventa specificamente più leggero al crescere della temperatura, e quindi ad una stessa pressione atmosferica corrisponde un'altezza maggiore. Si vede adunque la necessità di determinare la temperatura all'atto dell'osservazione per avere il dato necessario a calcolare l'altezza che avrebbe la colonna se fosse a zero. A tal fine serve un termometro montato sulla stessa tavola su cui è fissato il barometro. Tutto l'apparecchio è solidamente fissato ad un muro maestro del laboratorio, perchè si trovi nelle migliori condizioni di stabilità.

È quasi superfluo il notare che la canna barometrica deve essere riempita di mercurio puro e secco, con tutte le cautele che assicurino che nella camera barometrica non ci sia inizialmente, o si verifichi col tempo, qualsiasi traccia di umidità o di gas, in modo che la pressione nella camera barometrica sia costantemente nulla.

Negli *ordinari* barometri a mercurio, ci si accontenta di dare alla vaschetta una grande sezione, affinchè la quantità di mercurio che esce od entra nella canna, per effetto delle variazioni di pressione atmosferica, vi produca una insensibile differenza di livello. Il tubo viene disposto ben verticale e di lato si pone parallelamente un regolo diviso in millimetri, avente lo zero che sfiora la superficie libera del mercurio nella vaschetta.

Il *barometro di Fortin* è un tipo di barometro che pur conservando una sufficiente precisione, si presta ad essere trasportato in viaggio, come si richiede nella misura delle altitudini.

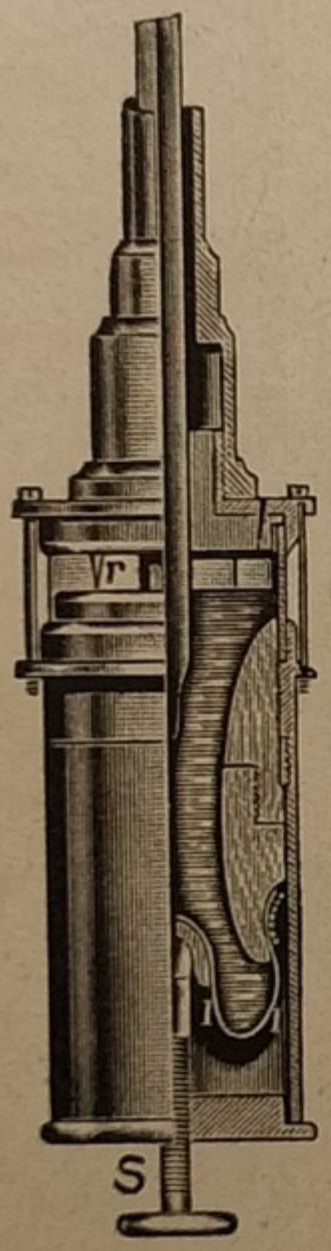

Fig. 167.

La parte originale di questo barometro è la vaschetta formata di un corto cilindro di vetro (fig. 167) compreso fra due anelli di legno, al superiore dei quali è unita la canna barometrica mediante un pezzo di pelle di camoscio, attraverso i pori della quale la pressione atmosferica esterna agisce sul mercurio della vaschetta. All'anello inferiore è legata una specie di borsa di cuoio *II*, che fa da fondo della vaschetta ed appoggia sopra una vite *S* che è impegnata nel fondo dell'astuccio metallico. I diversi pezzi sono tenuti insieme da tiranti a vite.

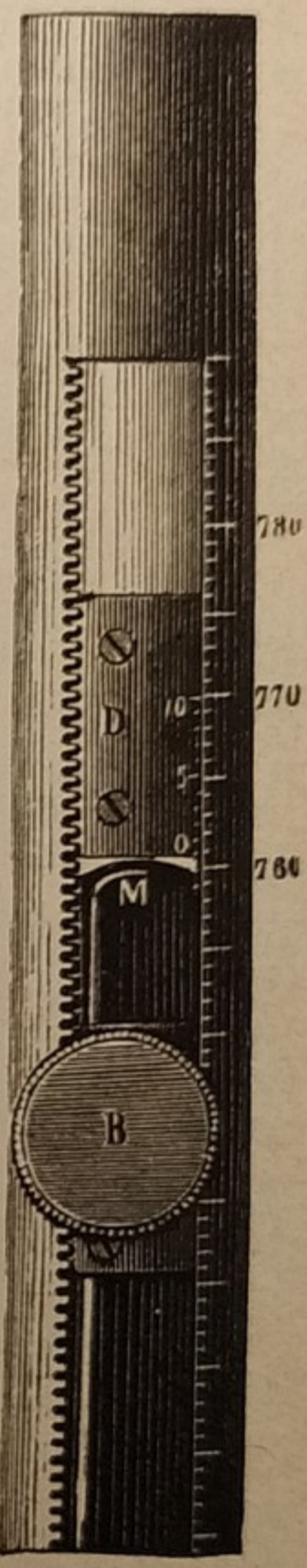

Fig. 168.

La scala è tracciata sopra una canna di ottone che avvolge il tubo barometrico e che porta verso l'alto due fenditure longitudinali opposte che lasciano vedere il mercurio (fig. 168). Per eseguire un'osservazione si gira la vite inferiore sì che il mercurio venga a sfiorare una punta fissa d'avorio *r* (fig. 167) che corrisponde allo zero della scala, e si nota a qual divisione della scala arriva il mercurio nella canna. A tale scopo mediante un bottone *B* (fig. 168), si fa muovere un corsoio *D*, il bordo

inferiore del quale viene portato sul piano orizzontale che passa per il vertice *M* del menisco del mercurio nel tubo.

Prima di trasportare questo barometro, si gira la vite *S* (fig. 167) fino a che tutta l'aria sia uscita attraverso la pelle di camoscio, ed il mercurio riempia completamente la camera barometrica. In tali condizioni l'apparecchio si può inclinare, scuotere o capovolgere senza pericolo di inconvenienti. Pel trasporto lo si chiude in un astuccio (fig. 169) che aperto costituisce senz'altro un treppiede di supporto dell'apparecchio.

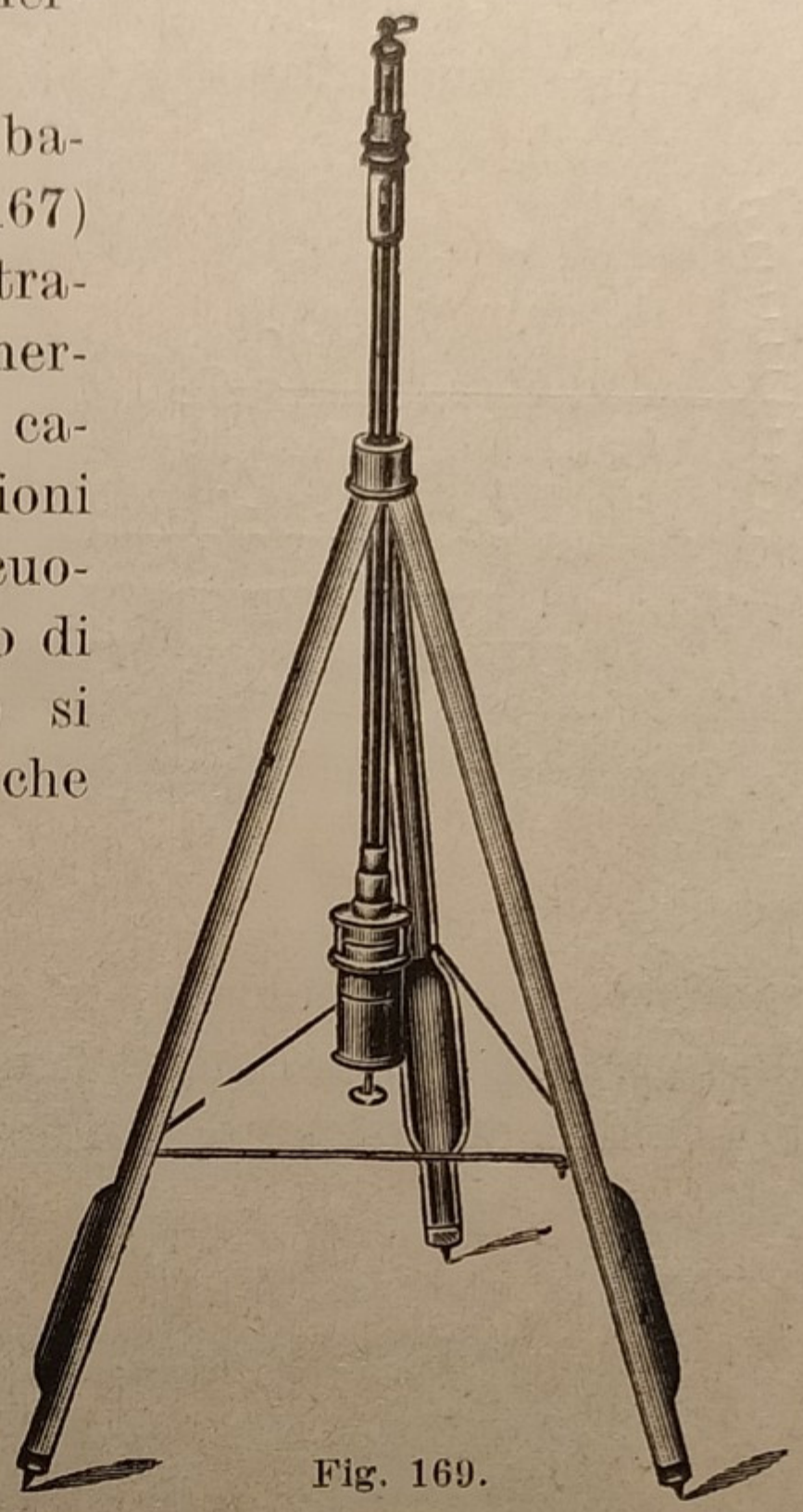

Fig. 169.

Il *barometro metallico* è uno strumento largamente usato, che, a parte l'esattezza, è certamente assai più comodo di quello a mercurio.

Il tipo più comune è il barometro *olosterico* (fig. 170), che consiste in una scatola d'ottone molto piatta, ermeticamente chiusa e vuotata completamente d'aria. Le due basi sono di lamina sottile e rese molto flessibili da ondulazioni anulari, sì da piegarsi ad ogni piccola variazione di pressione. Il centro della base inferiore è fissato alla custodia, mentre il centro del coperchio è fissato a un co-

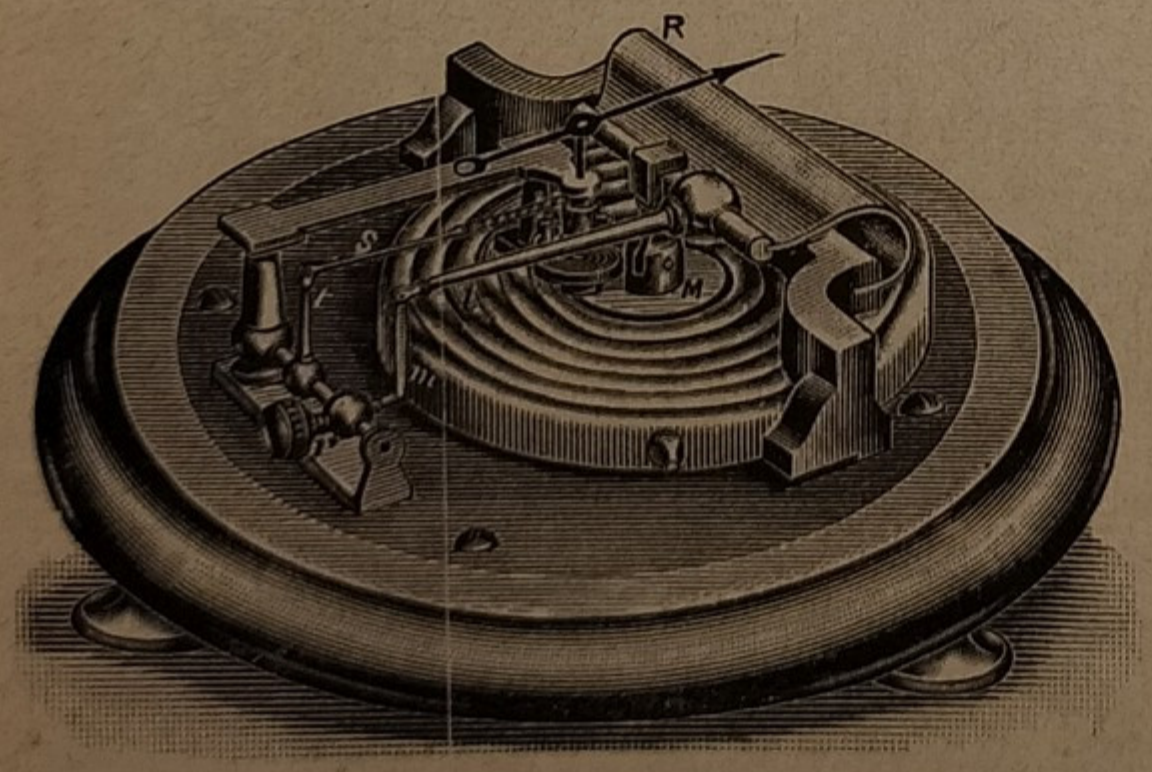

Fig. 170.

lonnino M raccomandato ad una larga molla R. I piccoli spostamenti del centro del coperchio provocati dalle variazioni della pressione atmosferica, vengono trasmessi alla lancetta mediante diversi organi che hanno principalmente il compito di amplificarli fortemente.

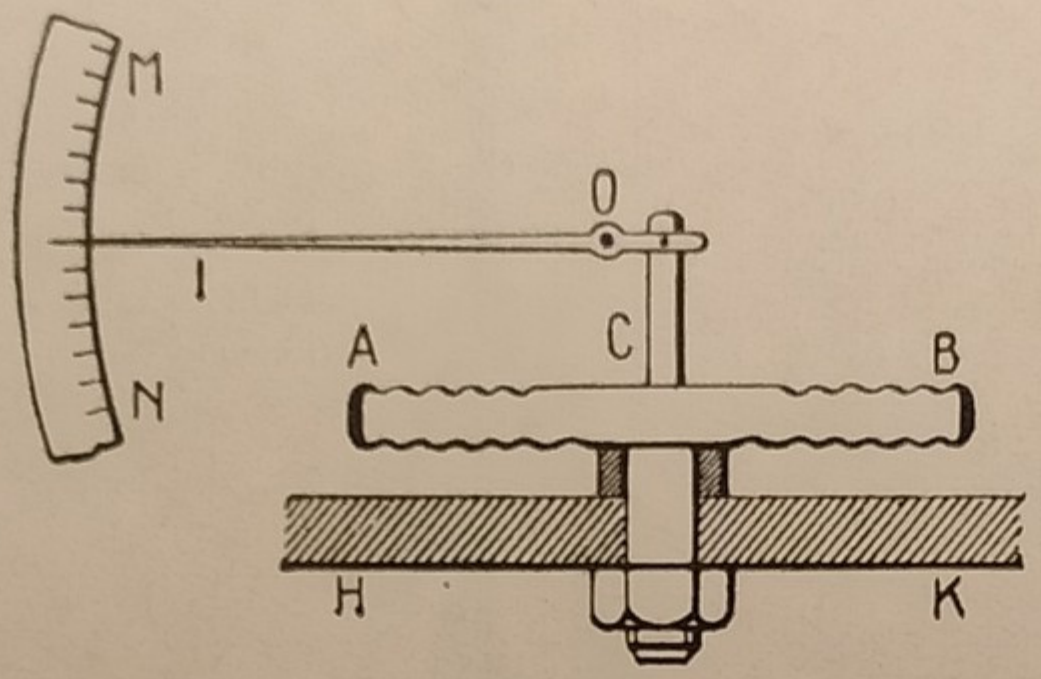

Fig. 171.

La figura 171 mostra schematicamente la struttura del barometro metallico: AB è la scatola in sezione, fissata nel centro della base inferiore. Il centro della base superiore abbassandosi o innalzandosi, per effetto di un aumento o di una diminuzione di pressione, trasmette i suoi movimenti ad un indice I il cui estremo si muove sopra un arco graduato MN.

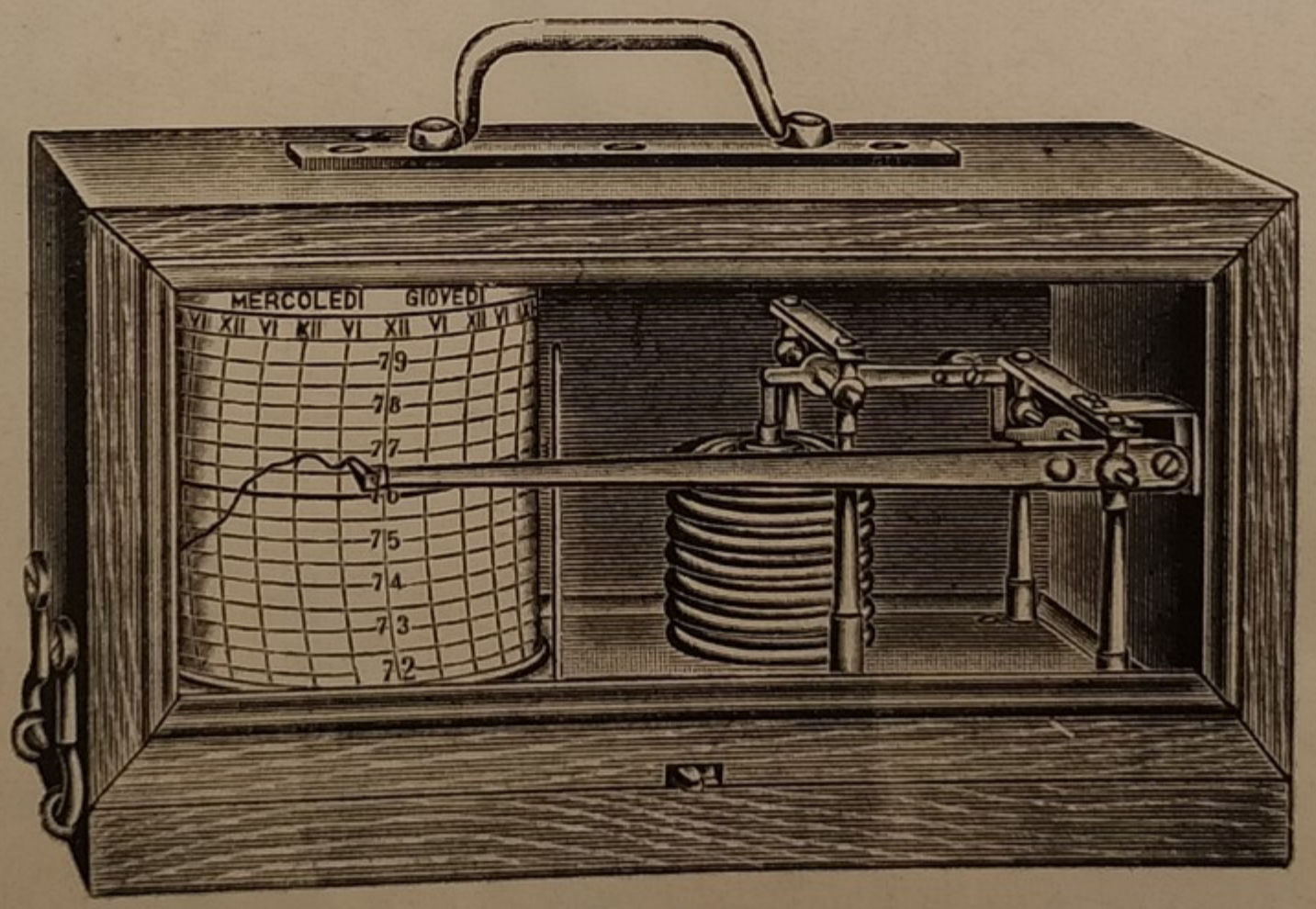

Fig. 172.

È facile intendere poi che la graduazione dei barometri metallici non si può fare che confrontandoli con quello a mercurio. Ma è da notarsi che col tempo si modifica la forma e la elasticità degli organi metallici, in guisa da rendere

necessaria di quando in quando la revisione della graduazione.

Descriveremo infine il *barometro registratore* o *barografo* (fig. 172). In esso troviamo sovrapposte più scatole metalliche, come quelle del barometro metallico, unite in *serie*, cioè in modo che la base della scatola che sta sotto essendo unita ad un piano fisso, il centro del coperchio della stessa scatola sia unito col centro della base della successiva, e così di seguito. Le diverse scatole A_1B_1, A_2B_2, ... possono anche comunicare fra di loro, come mostra schematicamente la figura 173, sempre però in modo che le basi adiacenti di due scatole successive sieno nel mezzo saldate l'una all'altra. Con tale disposizione la somma delle flessioni delle singole scatole viene assunta dal centro C del coperchio della scatola superiore e trasmessa con notevole amplificazione, mediante un sistema di leve, ad un indice. La estremità libera di questo

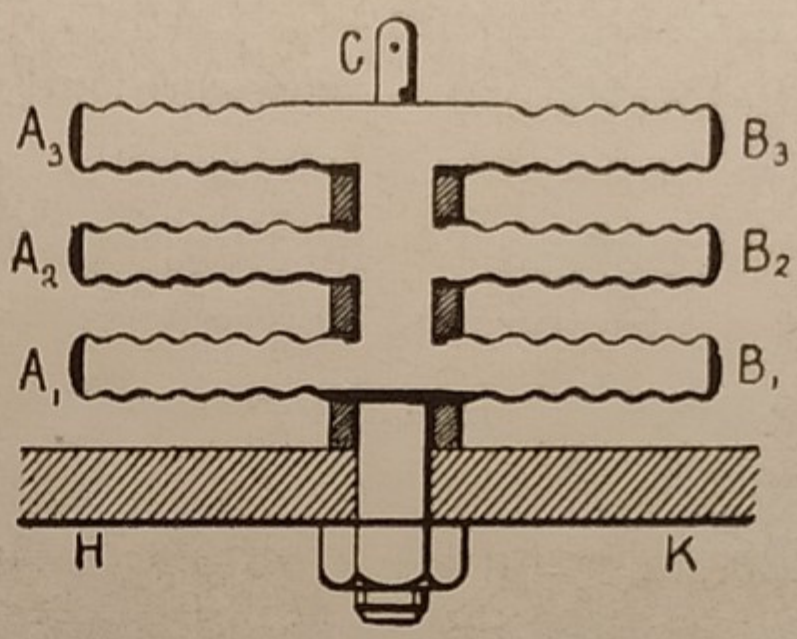

Fig. 173.

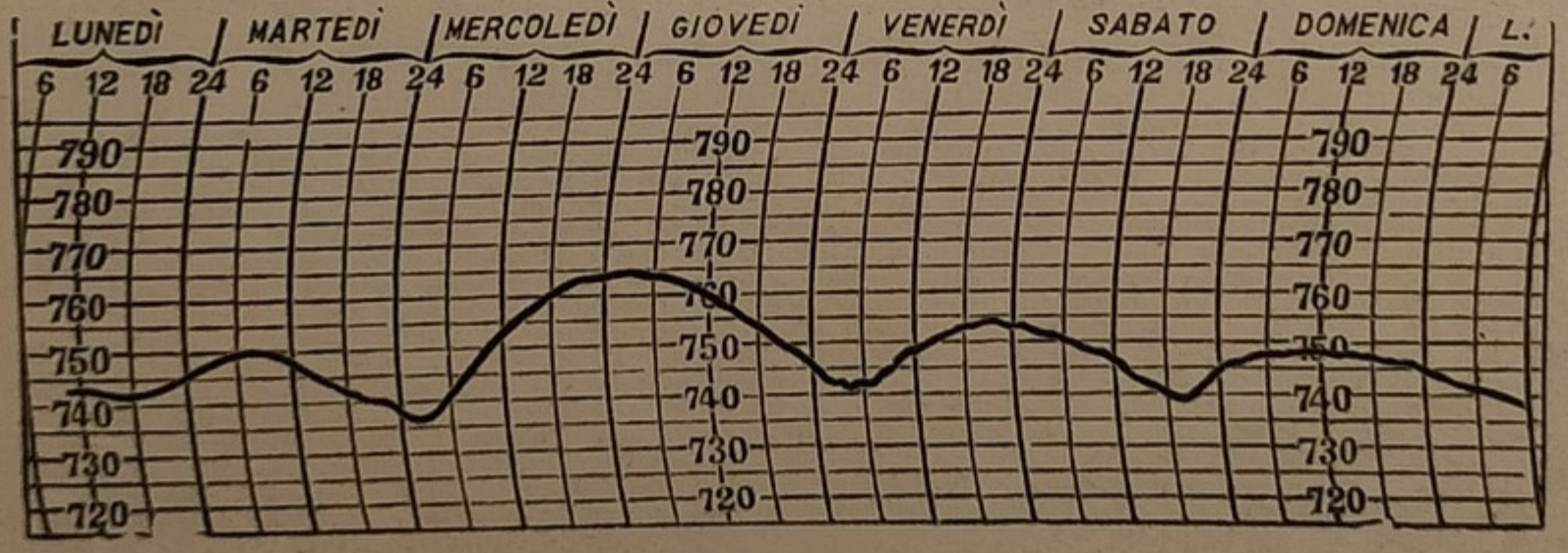

Fig. 174.

porta un pennino carico d'inchiostro, reso poco evaporabile coll'aggiunta di qualche po' di glicerina. Il pennino poggia sopra un foglio di carta quadrettata che ricopre un cilindro verticale, a cui un meccanismo d'orologeria fa fare un giro in 24 ore o in altro periodo di tempo a seconda delle diverse esigenze.

Si ottengono così dei diagrammi, come quello della fig. 174, che corrisponde a un'intera settimana.

50. Usi del barometro. — Per ricerche di laboratorio e per la Meteorologia, specialmente, l'uso del barometro è di estrema importanza. Al giorno d'oggi è anche largamente adoperato per la misura delle altezze nell'aereonavigazione.

La misura ha per base il fatto che la pressione barometrica diminuisce coll'altitudine, perchè gli strati d'aria che stanno al disotto non premono sul barometro. Ma la densità dell'aria diminuisce coll'altezza, e quindi non esiste proporzionalità tra questa e la diminuzione dell'altezza barometrica. Per conseguenza la misura delle altezze col barometro è un'operazione complessa e può solo esser fatta mediante l'uso di formole costruite in base alla teoria e a risultati sperimentali, o mediante apposite tavole dette *tavole altimetriche*, compilate con lo stesso processo. Riportiamo qui sotto una di tali tavole, limitata all'altezza di 2000^m, per salti di 100^m.

Elevazione					Diminuzione dell'altezza barometrica	
da	0	a	100	m.	mm.	9,5
»	100	»	200	»	»	9,4
»	200	»	300	»	»	9,3
»	300	»	400	»	»	9,2
»	400	»	500	»	»	9,0
»	500	»	600	»	»	8,9
»	600	»	700	»	»	8,7
»	700	»	800	»	»	8,6
»	800	»	900	»	»	8,5
»	900	»	1000	»	»	8,4
»	1000	»	1100	»	»	8,2
»	1100	»	1200	»	»	8,1
»	1200	»	1300	»	»	8,0
»	1300	»	1400	»	»	7,8
»	1400	»	1500	»	»	7,7
»	1500	»	1600	»	»	7,6
»	1600	»	1700	»	»	7,5
»	1700	»	1800	»	»	7,4
»	1800	»	1900	»	»	7,3
»	1900	»	2000	»	»	7,1

Un piccolo esempio sull'uso di detta tavola: in una certa stazione A, alta 200^m sul mare, il barometro segna 745^{mm} e in una stazione più alta B segna 690^{mm}, con una differenza di $745 - 690 = 55^{mm}$. La differenza di altezza fra A e B potremo calcolarla come segue:

Elevazione da	200 a 300 m.	mm.	9,3
»	» 300 » 400 »	»	9,2
»	» 400 » 500 »	»	9,0
»	» 500 » 600 »	»	8,9
»	» 600 » 700 »	»	8,7
»	» 700 » 800 »	»	8,6
totale . . .	600 m.	mm.	53,7

Per arrivare a mm. 55 mancano ancora mm. 1,3, i quali corrispondono a una elevazione x minore di 100 m., perchè nella successiva elevazione da 800 a 900 m. il barometro diminuisce di mm. 8,5. Il numero x si calcola con approssimazione mediante la proporzione:

$$x : 100 = 1{,}3 : 8{,}5$$

da cui:

$$x = 15^m{,}30.$$

Perciò la differenza di altezza fra le stazioni A e B è $615^m{,}30$ ed essendo A a 200^m sul mare, B sarà a $815^m{,}30$.

L'altimetria barometrica ha assunto una speciale importanza nella navigazione aerea. Un pilota, munito di un buon barometro metallico, potrebbe sempre calcolare l'altezza a cui si trova in un momento qualunque ricorrendo alle regole sopra esposte; ma per sottrarlo alla preoccupazione di calcoli che non potrebbe eseguire nelle condizioni in cui si trova, lo si fornisce di un *altimetro*, cioè di un comune barometro metallico, il quale oltre la graduazione della pressione in mm. porta l'indicazione delle altezze corrispondenti.

L'altimetro (fig. 175) porta due graduazioni: la prima è la solita, che dà la pressione atmosferica in centimetri di mercurio, l'altra indica l'altitudine in metri. Quest'ultima scala è segnata sopra un anello girevole attorno alla prima scala che è fissa, cosicchè l'aviatore alla partenza gira la scala mobile finchè la lancetta del barometro si trovi sul numero indicante la quota del punto di partenza.

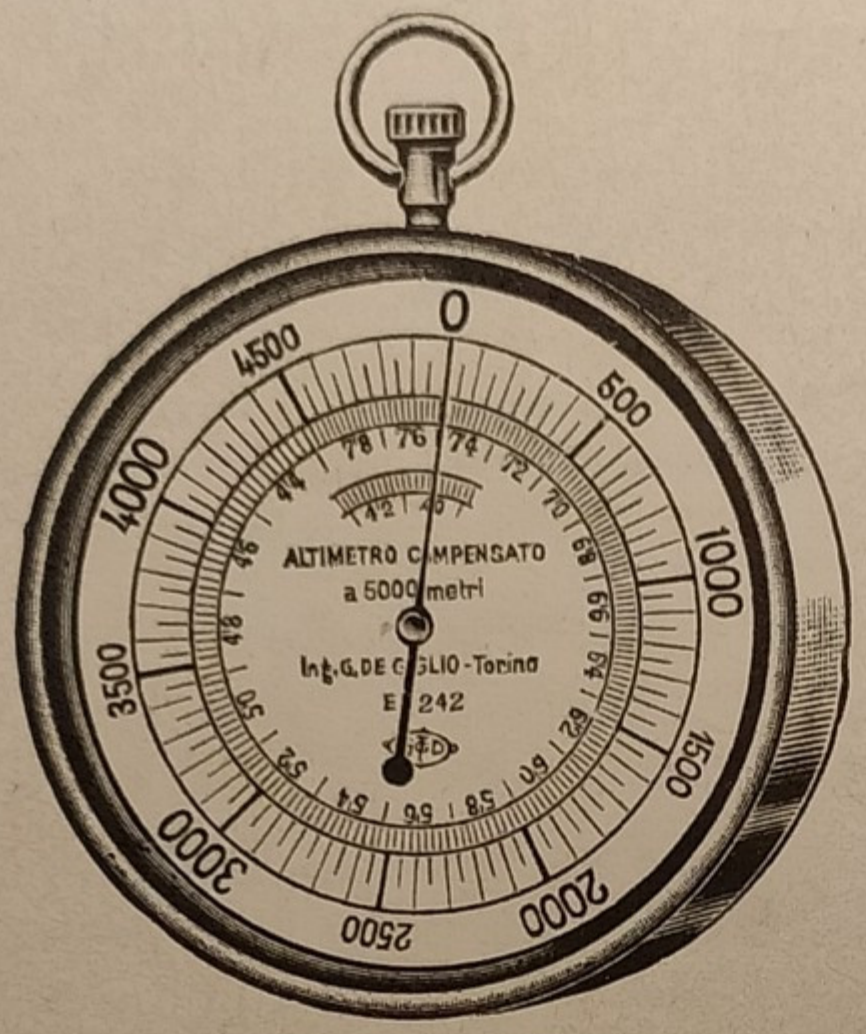

Fig. 175.

Spesso poi, sia durante i voli degli aeroplani che dei dirigibili, vengono usati degli *altimetri registratori* che non si differenziano in sostanza dai barometri registratori già noti (49), e il cui diagramma rappresenta un aumento inoppugnabile delle modalità con cui il volo si è compiuto e in particolar modo dell'altezza raggiunta dall'apparecchio.

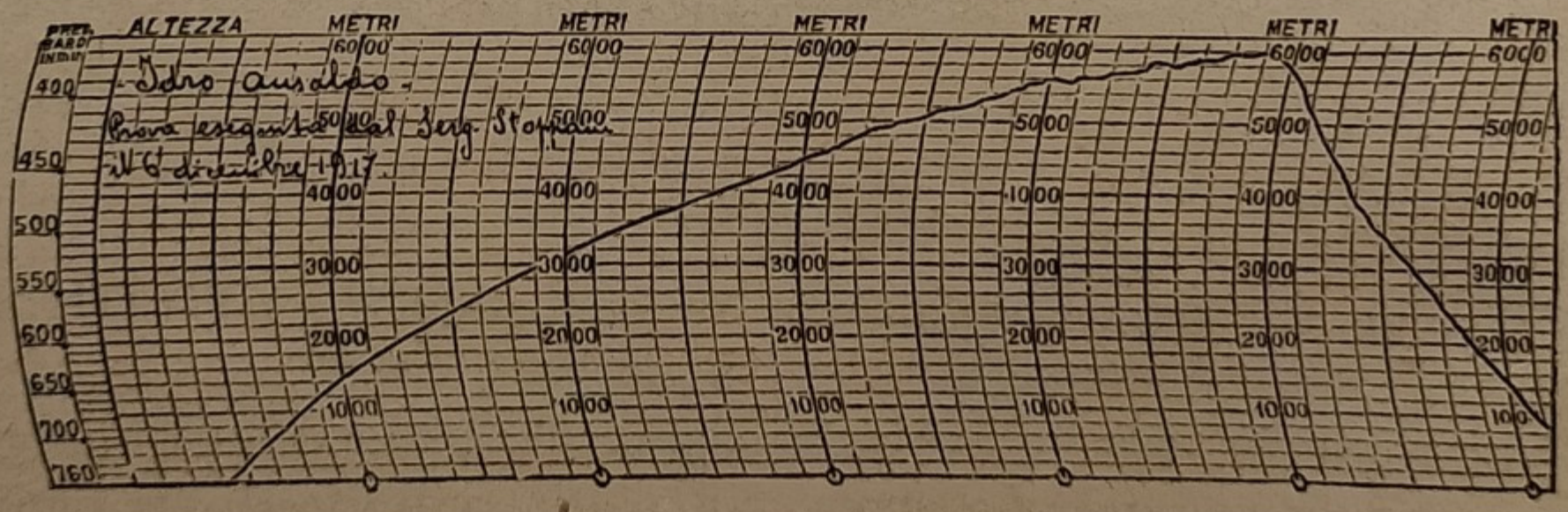

Fig. 176.

La figura 176 riproduce uno di tali grafici, in cui l'intervallo fra due linee orarie successive corrisponde a un minuto primo.

Degli usi del barometro a scopi meteorologici, si dirà alla fine della *Termologia*.

51. Legge di Boyle e Mariotte. — Con semplici esperienze abbiamo provato che i gas sono assai compressibili (3).

Due Fisici, inglese l'uno, il Boyle, l'altro francese, il Mariotte, verso la fine del XVII secolo, indipendentemente l'uno dall'altro, fecero conoscere la legge della compressibilità dei gas, che porta il loro nome.

Una massa di gas che ha un volume V sotto una pressione p, assoggettata a pressioni $2p$, $3p$, ... assume dei volumi $\frac{V}{2}$, $\frac{V}{3}$, ... e dei volumi $2V$, $3V$, ... sotto le pressioni $\frac{p}{2}$, $\frac{p}{3}$, ...

Sicchè V e V_1 essendo i volumi di una massa di gas, alla stessa temperatura, sotto le pressioni p e p_1, si avrà:

$$V : V_1 = p_1 : p \quad \text{ossia} \quad Vp = V_1 p_1 ; \qquad (1)$$

da ciò la legge:

A temperatura costante, i volumi d'una massa di gas sono inversamente proporzionali alle pressioni che sopporta; o ancora:

Il prodotto del volume d'una massa di gas per la pressione a cui è soggetta, è costante; inteso sempre che la temperatura rimanga fissa.

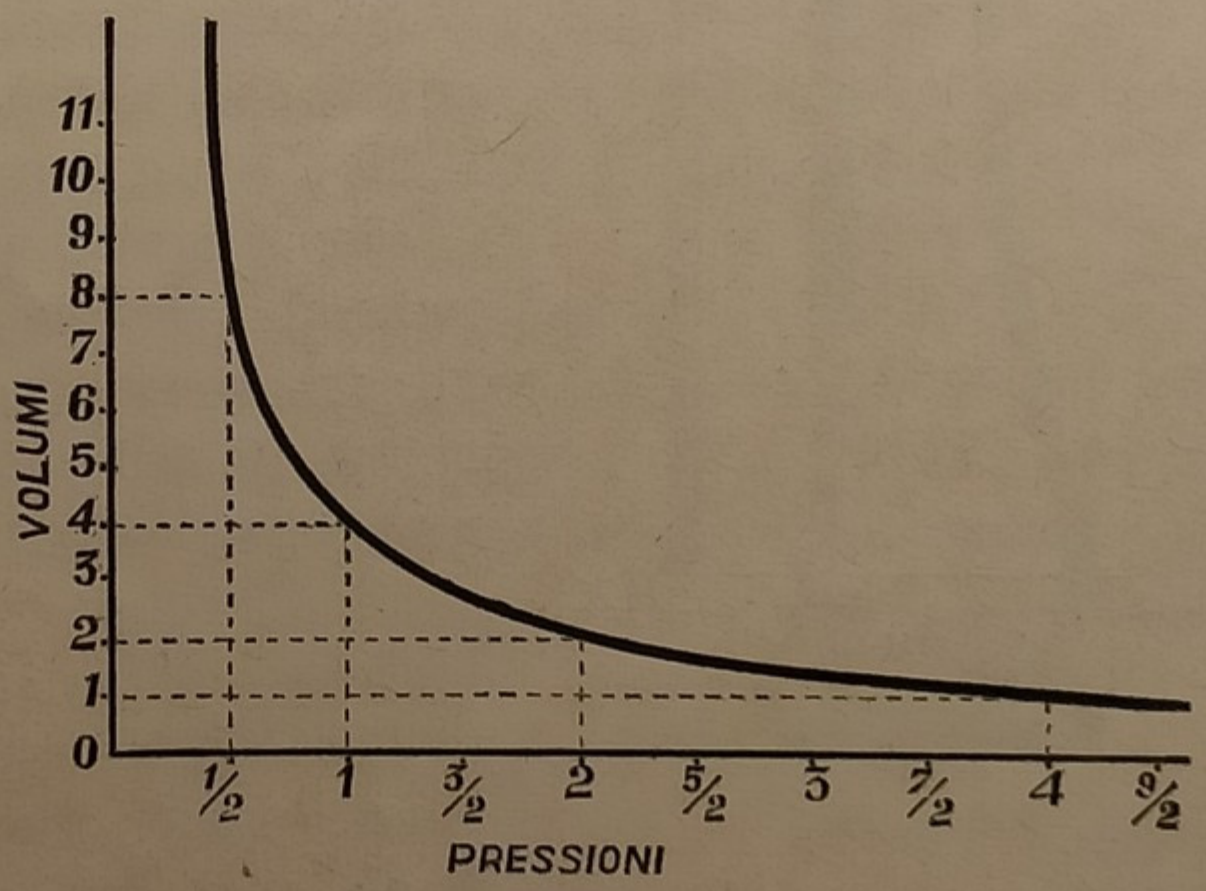

Fig. 177.

La legge di Boyle è evidentemente rappresentata graficamente dalla curva della fig. 177, nella quale sono contate in ascisse le pressioni e in ordinate i volumi; la curva è una iperbole.

Osservando poi che, a parità di massa, la densità di uno stesso corpo è inversamente proporzionale al volume (44), cioè

$$D : D_1 = V_1 : V,$$

nel caso che V e V_1 sieno i volumi di una stessa massa di gas alle pressioni p e p_1, si ha per la prima delle (1)

$$D : D_1 = p : p_1 ,$$

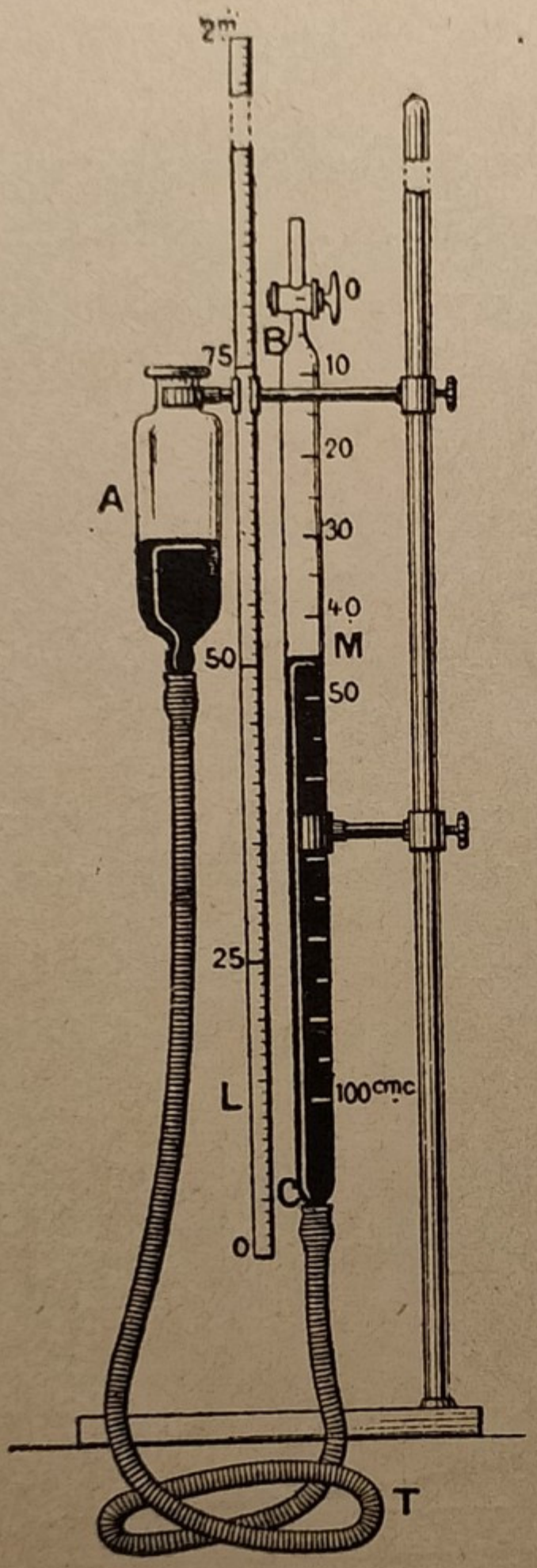

Fig. 178.

cioè *la densità di un gas, a temperatura costante, varia proporzionalmente alla pressione.*

Della legge si può dare una verifica. L'apparecchio della figura 178 è formato di un tubo BC munito in alto di un robinetto O e comunicante inferiormente, per mezzo di un robusto tubo di gomma T, con un serbatoio A aperto in alto. Tanto il tubo BC quanto il serbatoio A si possono spostare in senso verticale, indipendentemente l'uno dall'altro, e tra i due viene posto un regolo diviso L.

Nell'apparecchio è posto del mercurio, che riempie tutto il tubo flessibile T e una parte dei tubi di vetro.

Per eseguire un'esperienza si comincia a portare il serbatoio A a tale altezza che, essendo aperto il robinetto del tubo B, in questo si trovi una colonna d'aria che occupi 60 divisioni; il tubo essendo cilindrico, il numero 60 potrà prendersi come misura del volume dell'aria. In tali condizioni il mercurio è allo stesso livello nei due rami; e perciò nel tubo B, chiuso il robinetto, si ha una massa d'aria alla pressione indicata dal barometro, che supporremo di 76 centimetri di mercurio. Si solleva allora il serbatoio A fino a tanto che tra questo e il tubo B si abbia nel mercurio un dislivello di 76 centimetri; con ciò la pressione cui è soggetta l'aria è di 2 *volte* 76 centimetri, e si vedrà il volume dell'aria ridotto a 30 divisioni,

cioè *a metà* del volume iniziale. Se l'apparecchio lo permette, solleviamo ancora il serbatoio *A* fino ad ottenere un dislivello di 2 *volte* 76 centimetri; l'aria allora è soggetta alla pressione di 3 *volte* 76 centimetri, e il suo volume si riduce a 20 divisioni, cioè a *un terzo* del volume iniziale.

Per sperimentare a pressioni inferiori a 76 centimetri, il serbatoio *A* viene abbassato finchè, ad esempio, si manifesti un dislivello, in senso contrario a quello di prima, di 38 centimetri, con che l'aria rimane sottoposta alla pressione di $76 - 38 = 38$ centimetri, vale a dire *a metà* di 76 centimetri; si riscontra che l'aria occupa nel tubo 120 divisioni, cioè il *doppio* del volume iniziale.

Le esperienze descritte però verificano la legge di Boyle e Mariotte solo in maniera approssimativa. Ricerche di precisione fatte da una schiera di Fisici eminenti (Despretz, Régnault, Natterer, Amagat, ecc.) hanno concluso che i diversi gas non seguono la stessa legge di compressibilità, e che non la segue nemmeno uno stesso gas in diverse condizioni di temperatura e di pressione. Tuttavia alcuni gas comuni, quali l'azoto, l'ossigeno, l'aria e l'idrogeno, per piccole variazioni di pressione e a temperature non molto distanti da zero seguono la legge di Boyle e Mariotte con discreta approssimazione.

52. Misura della pressione dei fluidi (manometri, vacuometri). — Poichè la pressione di un fluido è la forza con cui esso preme sopra 1 cm^2 della superficie del corpo con cui è a contatto, in modo particolare della superficie del recipiente in cui è contenuto (36), l'unità di pressione dovrebbe essere logicamente 1 grammo, 1 chilogrammo, 1 dina per cm^2. Molto spesso però si prende come unità di pressione l'*atmosfera* (47) o il *centimetro di mercurio*. In tutti i casi la pressione viene ottenuta coi *manometri*.

Il *manometro ad aria libera* è formato di un tubo *M* (fig. 179) aperto all'aria libera, e comunicante con una vaschetta o serbatoio *C*, contenente il liquido manometrico. La vaschetta è posta in comunicazione, mediante un tubo a robinetto *R*, col serbatoio dove c'è il fluido di cui si vuole misurare la pressione. Sia *y* l'altezza *verticale* a cui si innalza il liquido nel

tubo al disopra del livello della vaschetta e indichiamo con H la pressione atmosferica, espressa in centimetri, del liquido che sta nel manometro. La pressione P cercata, espressa in centimetri, del liquido manometrico, è:

$$P = y + H.$$

Se il liquido usato è il mercurio, il dislivello è $y = 56^{cm}$ e il barometro indica una pressione $H = 76^{cm}$, la pressione del fluido è:

$$P = 76 + 56 = 132^{cm} \text{ di mercurio.}$$

O altrimenti, avuto riguardo alla formola $F = Shp$ del § 39 e ricordando che la pressione $P = \frac{F}{S}$, si ha: $P = hp$. Nel caso nostro è:

$$P = 132 \times 13{,}6 = 1795 \ gr.\ per\ cm^2$$

essendo il peso specifico del mercurio $p = 13{,}6$. E ancora, 1 atmosfera equivalendo a una colonna di mercurio di 76^{cm}:

$$P = \frac{132}{76} = 1{,}4 \ atmosfere.$$

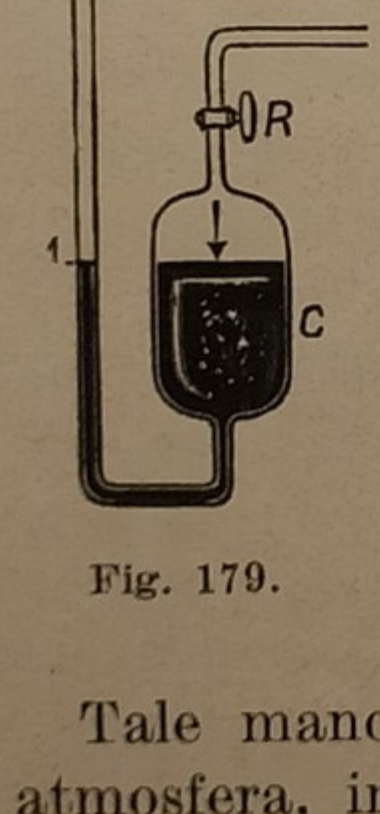

Fig. 179.

Il manometro ad aria libera ha il pregio di mantenere una *sensibilità costante*, vale a dire che una stessa variazione di pressione corrisponde sempre a una stessa differenza di livello.

Tale manometro però serve solo per pressioni di qualche atmosfera, in causa della altezza eccessiva che bisognerebbe dare al tubo per pressioni elevate.

Per piccole pressioni al disopra dell'atmosferica si usa di preferenza come liquido manometrico l'acqua; un tale manometro viene usato per verificare la pressione del gas illuminante nei tubi che lo distribuiscono; anzi in questo caso la pressione del gas si esprime senz'altro *in centimetri d'acqua*, quant'è la differenza di livello dell'acqua nei due rami del manometro.

Nel *manometro ad aria compressa* troviamo un tubo ad U (fig. 180), nel quale uno dei rami è chiuso e contiene una massa d'aria secca limitata, la cui pressione aumenta quando il suo volume diminuisce (51). Il secondo ramo del tubo è posto in comunicazione col serbatoio che contiene il fluido di cui si vuol misurare la pressione; nel gomito dei due tubi c'è del mercurio. Questo liquido sale nel ramo chiuso quando la pressione nel serbatoio aumenta; e quando l'equilibrio è raggiunto, la pressione cercata *è la somma della pressione dell'aria imprigionata nel ramo chiuso del manometro, e della pressione della colonna di mercurio compresa tra le superficie libere nei due rami.*

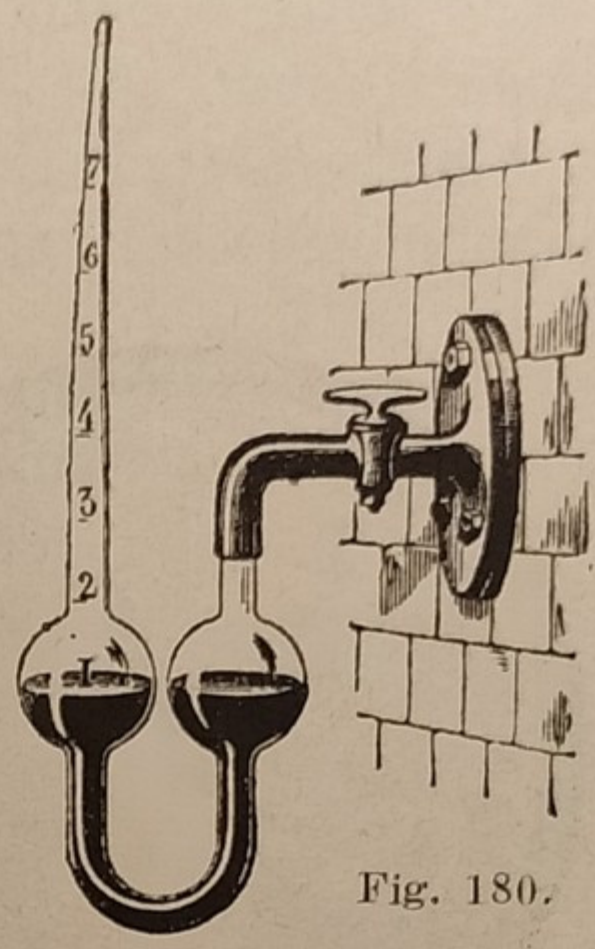

Fig. 180.

Il manometro ad aria compressa è graduato per confronto con un manometro campione.

Il funzionamento del *manometro metallico* è fondato sulla elasticità dei metalli, come avveniva nel barometro metallico (49).

Il tipo Bourdon, che è il più in uso, si compone di un tubo AB (fig. 181), a pareti sottili di ottone, a sezione elittica — per essere più deformabile — piegato ad anello. La estremità A del tubo, che è fissa, è posta in comunicazione, mediante un innesto a vite V, col serbatoio a pressione; l'altra estremità B, chiusa e libera come il resto del tubo, comanda, mediante un settore dentato S e un rocchetto dentato r, un indice H che si sposta sopra un quadrante diviso. Quando la pressione aumenta nell'interno del tubo, l'estremità libera B

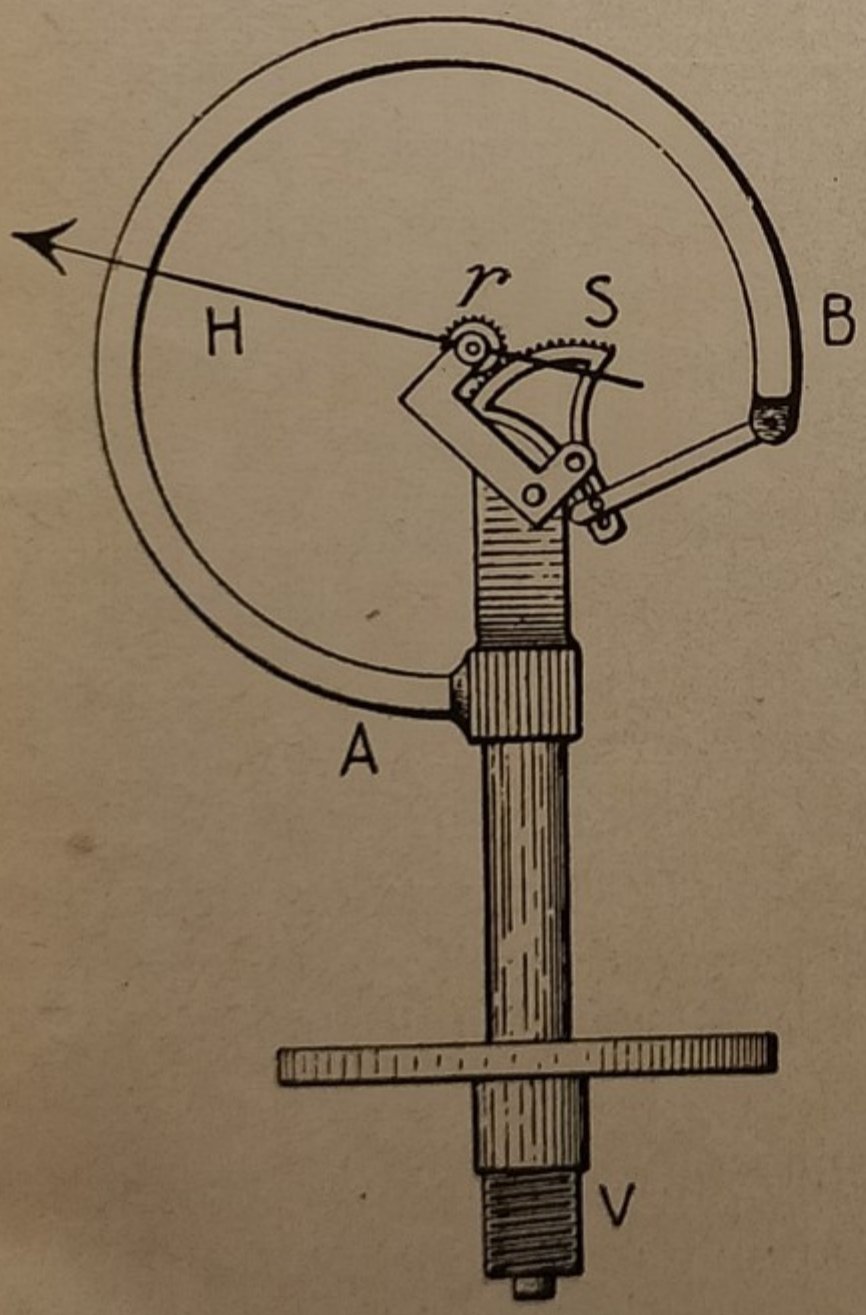

Fig. 181.

si allontana dalla estremità fissa *A*, ciò che fa avanzare l'indice sulla graduazione; il contrario avviene quando la pressione diminuisce.

I manometri metallici sono graduati per confronto con un manometro campione, e dànno la pressione o in atomsfere o più spesso in chilogrammi per centimetro quadrato.

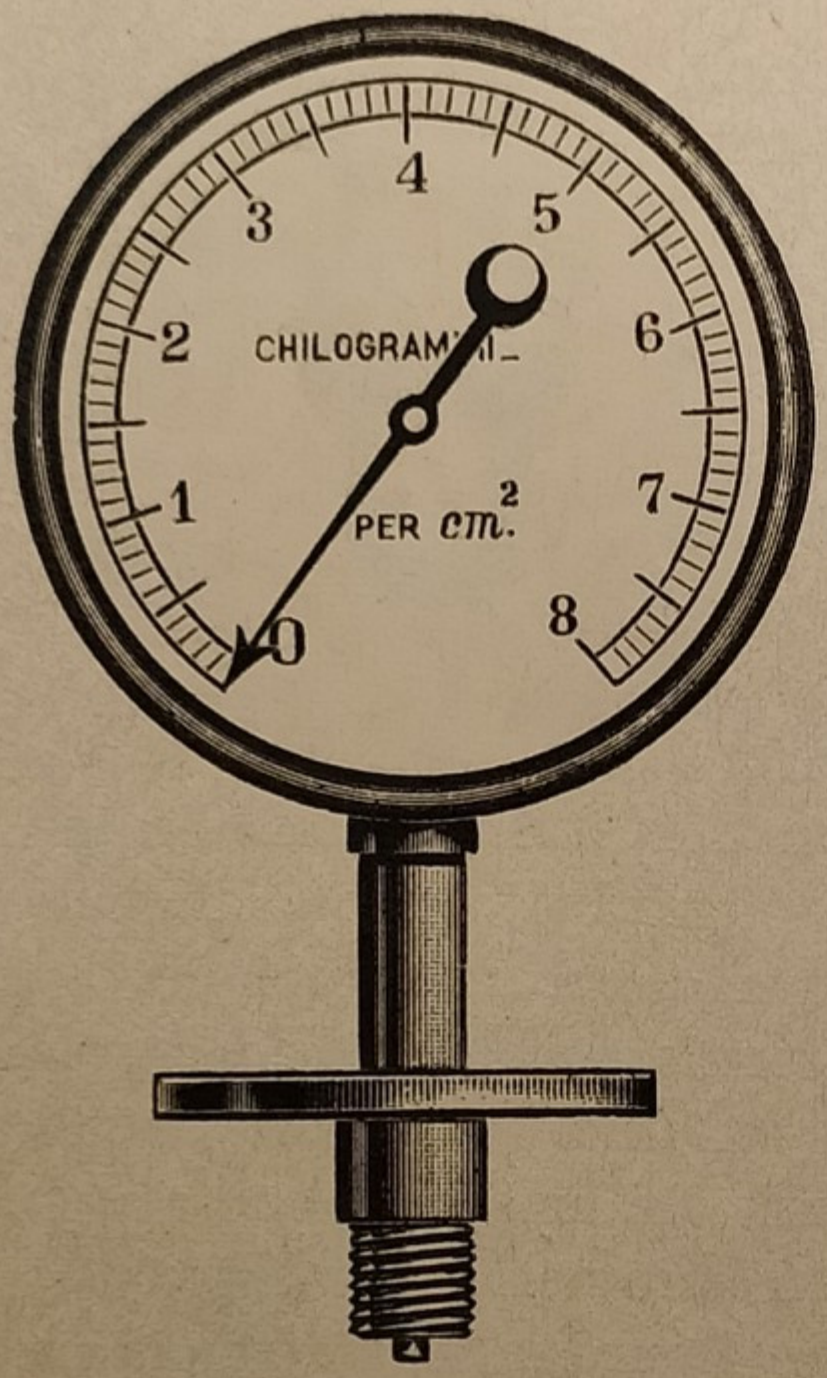

Fig. 182.

La fig. 182 rappresenta l'apparecchio nel suo aspetto esterno.

I *vacuometri*, come indica chiaramente il nome, sono dei veri e propri manometri destinati alla misura di pressioni inferiori all'atmosfera. Il *provino* della macchina pneumatica, come si vedrà (54), è un vero e proprio vacuometro.

I vacuometri industriali sono per struttura identici al manometro metallico poco sopra descritto; la diminuzione di pressione obbliga il tubo metallico ad incurvarsi maggiormente, ciò che determina il movimento dell'indice, ma solo da 1 atmosfera in giù.

Per la misura di debolissime pressioni di frazioni anche piccole di millimetro di mercurio, quali si hanno in particolar modo nei famosi tubi per i raggi X e nelle lampadine degli apparecchi radioriceventi, si ricorre a particolari procedimenti che qui non possono venire esposti.

53. Moto dei fluidi. — Il moto di un liquido può avvenire per effetto della gravità, come è il caso dell'acqua che scorre in un canale o in un fiume a letto inclinato, oppure per una differenza di pressione, che può avere origine naturale o artificiale.

Una differenza di pressione, è anche la causa che determina il movimento di un gas.

Il movimento di un fluido si ottiene particolarmente con le *pompe*, e cominceremo a descriverne una, detta *pompa universale*, perchè è il tipo di tutte le pompe a stantuffo.

Entro un cilindro cavo (fig. 183), detto *corpo di pompa*, si trova uno stantuffo unito ad un'asta che serve ad imprimergli un movimento di salita e di discesa. Il fondo del corpo di pompa ha due fori comunicanti coi due tubi T e T', muniti di *valvole coniche* Z e Z' tenute a posto da una leggera molla a spirale. La valvola Z si apre dall'esterno verso l'interno, la Z' invece si apre verso l'esterno. Sui tubi T e T' si trovano due robinetti R ed R'. Supponiamo che tali robinetti siano aperti e che lo stantuffo tocchi il fondo del corpo di pompa. Per quanto accurata sia la costruzione dell'apparecchio, la base dello stantuffo e il fondo del corpo di pompa non combaceranno mai esattamente, ma rimarrà fra essi uno spazio libero, detto *spazio nocivo*, pieno d'aria. Alzando lo stantuffo, il volume di quest'aria aumenta, e quindi diminuisce di pressione, per conseguenza la valvola Z' poggerà anche più fortemente contro la sua sede, ma la valvola Z si aprirà per l'eccesso della pressione atmosferica e quindi pel tubo T entrerà dell'aria nel corpo di pompa. Spingendo poi in basso lo stantuffo, la pressione interna verrà ad aumentare, aprirà la valvola Z' e l'aria uscirà dal tubo T'. Ripetendo il gioco, potremo far passare una quantità indefinita d'aria da sinistra verso destra attraverso l'apparecchio.

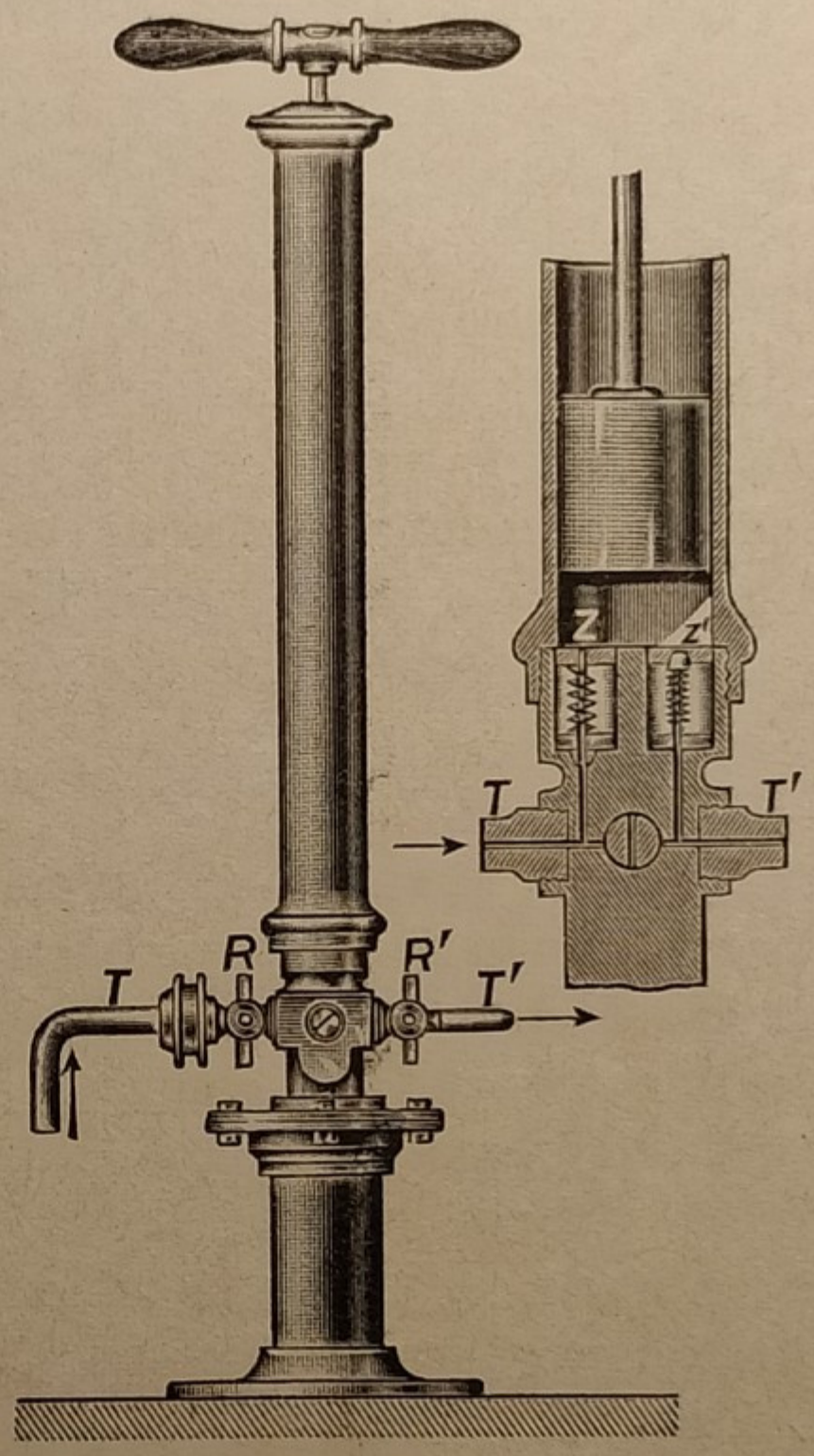

Fig. 183.

Or si comprende che se il tubo T' comunica con un reci-

piente chiuso, potremo iniettarvi dell'aria, e lo strumento agirà da *compressore*. Giova però avvertire che tale compressione non può, per una data pompa, superare un certo limite, che dipende dal rapporto tra la capacità del corpo di pompa e quella dello spazio nocivo. Per esempio, supponiamo che lo spazio nocivo sia $\frac{1}{100}$ dell'intero volume del corpo di pompa, e che la compressione sia stata già spinta a 100 atmosfere. Se allora portiamo lo stantuffo al limite superiore della sua corsa, la pressione dell'aria nella pompa è di 1 atmosfera, perchè durante l'ascesa dello stantuffo, la valvola Z è rimasta aperta. Abbassando allora lo stantuffo se si vuole che l'aria contenuta nel corpo di pompa possa attraversare la valvola Z' bisogna che assuma una pressione qualche po' superiore a 100 atmosfere. Ma ciò non è possibile, perchè, arrivato lo stantuffo al limite inferiore della sua corsa, l'aria del corpo di pompa viene ridotta al volume dello spazio nocivo, cioè a $\frac{1}{100}$ del suo volume iniziale, e vi raggiunge appena la pressione di 100 atmosfere senza superarla. Da quell'istante in poi anche continuando a mantenere in moto lo stantuffo, resta nel corpo di pompa una massa fissa d'aria, che quando lo stantuffo è in alto occupa tutto il corpo di pompa, e quando è in basso si annida tutta nello spazio nocivo, senza poter raggiungere la pressione necessaria ad aprire la valvola Z'.

Se invece si mette il tubo T in comunicazione con un recipiente chiuso, ad ogni colpo di stantuffo verrà estratta una certa quantità d'aria che attraverso il tubo T' verrà spinta nell'atmosfera. In tal modo l'apparecchio agisce da *macchina pneumatica*. Anche per la *rarefazione*, operata in tal guisa, c'è un limite, come si potrebbe stabilire con un ragionamento analogo al precedente.

La *pompa da bicicletta* è composta di un tubo metallico C, formante il corpo di pompa, e di uno stantuffo P, che è un semplice pezzo di cuoio col bordo piegato in basso e appoggiato contro le pareti del cilindro. L'asta dello stantuffo è unita in alto con una specie di scatola A che serve da manubrio e che copre una porzione del corpo di pompa, all'estremità superiore del quale si trova un piccolo

foro *O* (fig. 184) che permette l'entrata dell'aria. L'estremità inferiore porta un foro *M* con madrevite per potervi raccordare il tubo in caoutchouc che dall'altra parte si avvita alla valvola del pneumatico.

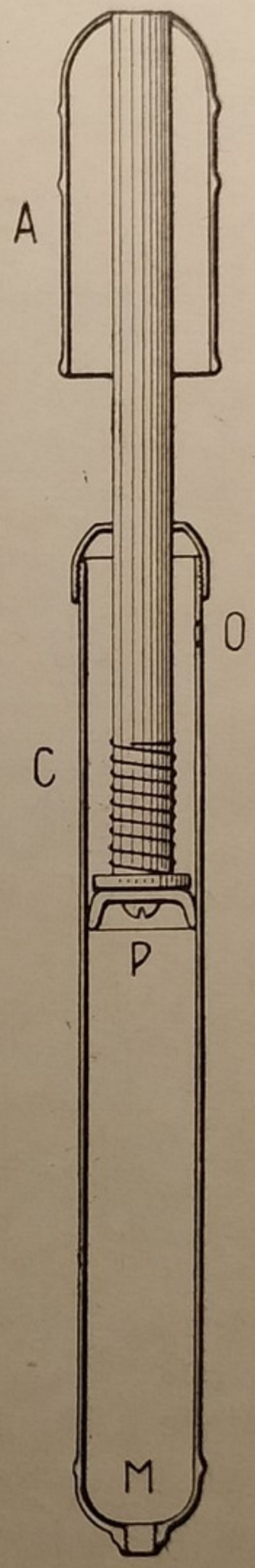

Fig. 184.

Supposto lo stantuffo all'estremo superiore del corpo di pompa, questo è pieno d'aria che viene compressa quando si fa discendere lo stantuffo impugnando il manubrio *A*; l'aria passa così nel pneumatico sollevandone la valvola che si apre dall'esterno verso l'interno e per tal ragione non potrà tornare indietro. Tirando in su lo stantuffo, al di sotto di questo si forma una rarefazione, per cui l'aria atmosferica, che entra per il foro *O*, preme sul bordo dello stantuffo e in qualche punto lo stacca dalla parete del cilindro aprendosi la via per passare sotto lo stantuffo. Abbassando nuovamente lo stantuffo anche quest'aria viene iniettata nel pneumatico, e così di seguito.

54. Macchina pneumatica. — La struttura di questa macchina, inventata nel 1650 da Ottone di Guericke, borgomastro di Magdeburgo, non è sostanzialmente diversa da quella della pompa ad aria descritta. Anche nella macchina pneumatica troviamo infatti un tubo cilindrico in cui è scorrevole uno stantuffo, ma le valvole hanno delle disposizioni speciali intese al miglior funzionamento della macchina. Lo stantuffo non è in questo caso *cieco*, ma è munito di una valvola *h*, collocata in una cavità interna, che si apre dall'interno del corpo di pompa verso l'esterno (fig. 185). L'altra valvola *I* in forma di tronco di cono, poggia contro l'orifizio conico del tubo che va al recipiente che si vuol vuotare, ed è portata da un'asta *t* che passa a sfregamento forte attraverso lo stantuffo. Questo, sollevandosi, trascina con sè l'asta *t*, con che la valvola inferiore si solleva, ma per poco, poichè l'asta è

subito arrestata perchè una rosetta K, fissata nella sua parte superiore, viene ad appoggiare contro il coperchio del corpo di pompa; in tal modo la valvola inferiore rimane aperta per tutta la salita dello stantuffo. Nella discesa dello stantuffo, l'asta lo segue per un istante e riappoggia la valvola contro il foro; lo stantuffo continua a discendere strisciando contro l'asta, e l'aria che gli sta sotto, ridotta a minor volume, acquista una pressione sufficiente per aprire la valvola h ed uscire nell'atmosfera. In tal

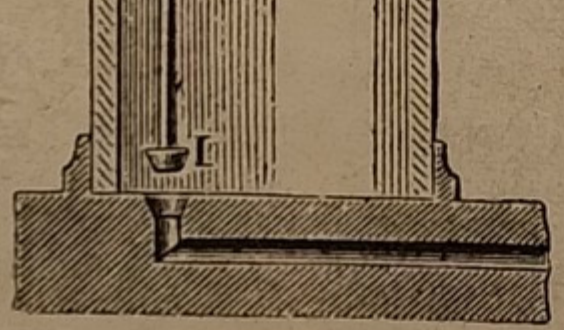

Fig. 185.

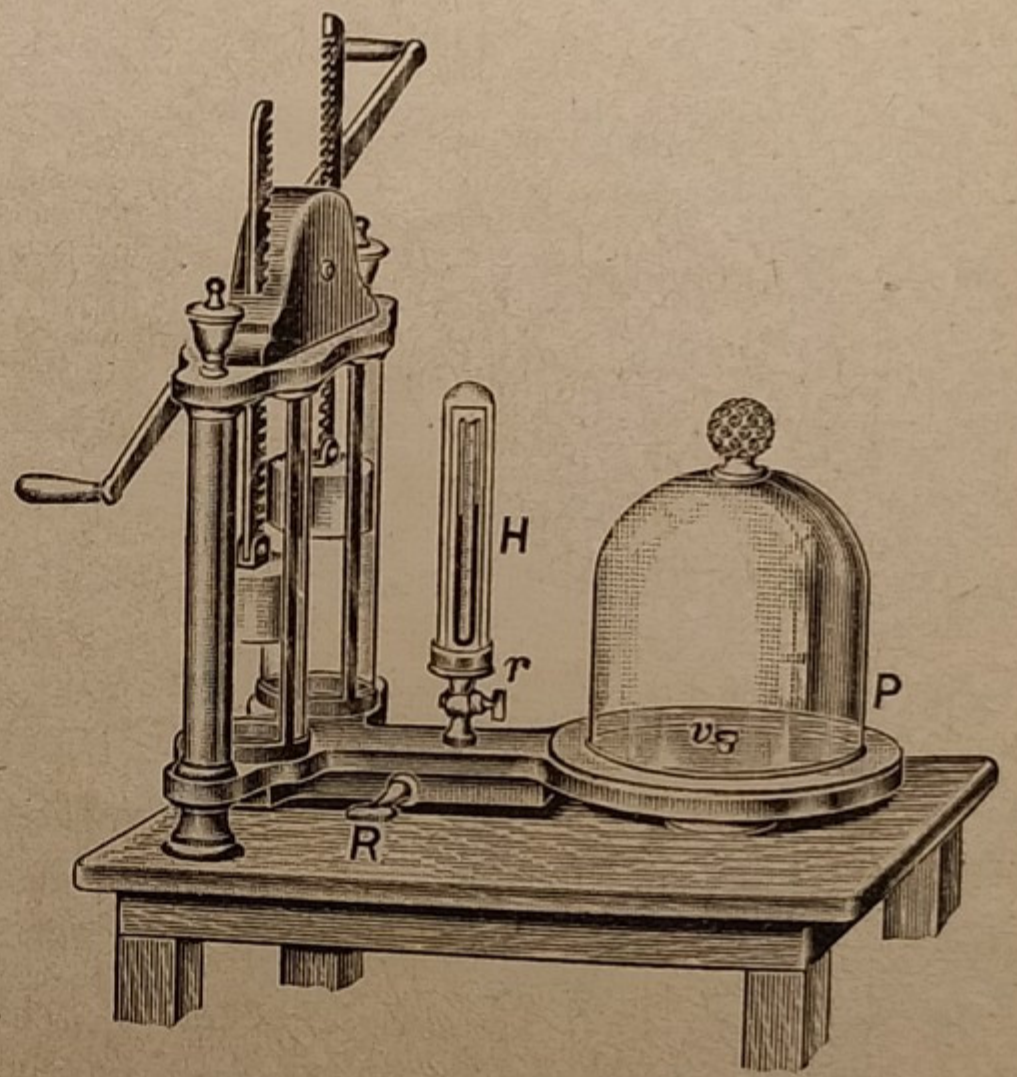

Fig. 186.

modo è assicurata la comunicazione tra il recipiente da vuotare e il corpo di pompa anche quando la pressione nel recipiente non avrebbe più la forza di sollevare la valvola inferiore.

Molto spesso si accoppiano due corpi di pompa comunicanti con l'unico canale che va al recipiente. Il moto dei due stantuffi si ottiene mediante un unico manubrio a due impugnature che mette in moto una ruota dentata, la quale s'impegna contro le aste dentate degli stantuffi. In tal modo gli stantuffi eseguiscono delle corse opposte, e le pressioni che l'atmosfera esercita sulle basi superiori, si fanno in ogni momento equilibrio. Invece con la macchina a un sol corpo, quando al

disotto dello stantuffo si ha quasi il vuoto perfetto, per sollevarlo occorre applicarvi una forza equivalente a 1 kg. circa per cm² (47).

La figura 186 mostra la struttura della macchina pneumatica bicilindrica.

Qualunque sia il tipo della macchina, il canale comunicante coi corpi di pompa sbocca in *v* nel mezzo del piatto sul quale si appoggia la campana *P*, della quale si assicura la perfetta tenuta ungendone il bordo con qualche po' di sego.

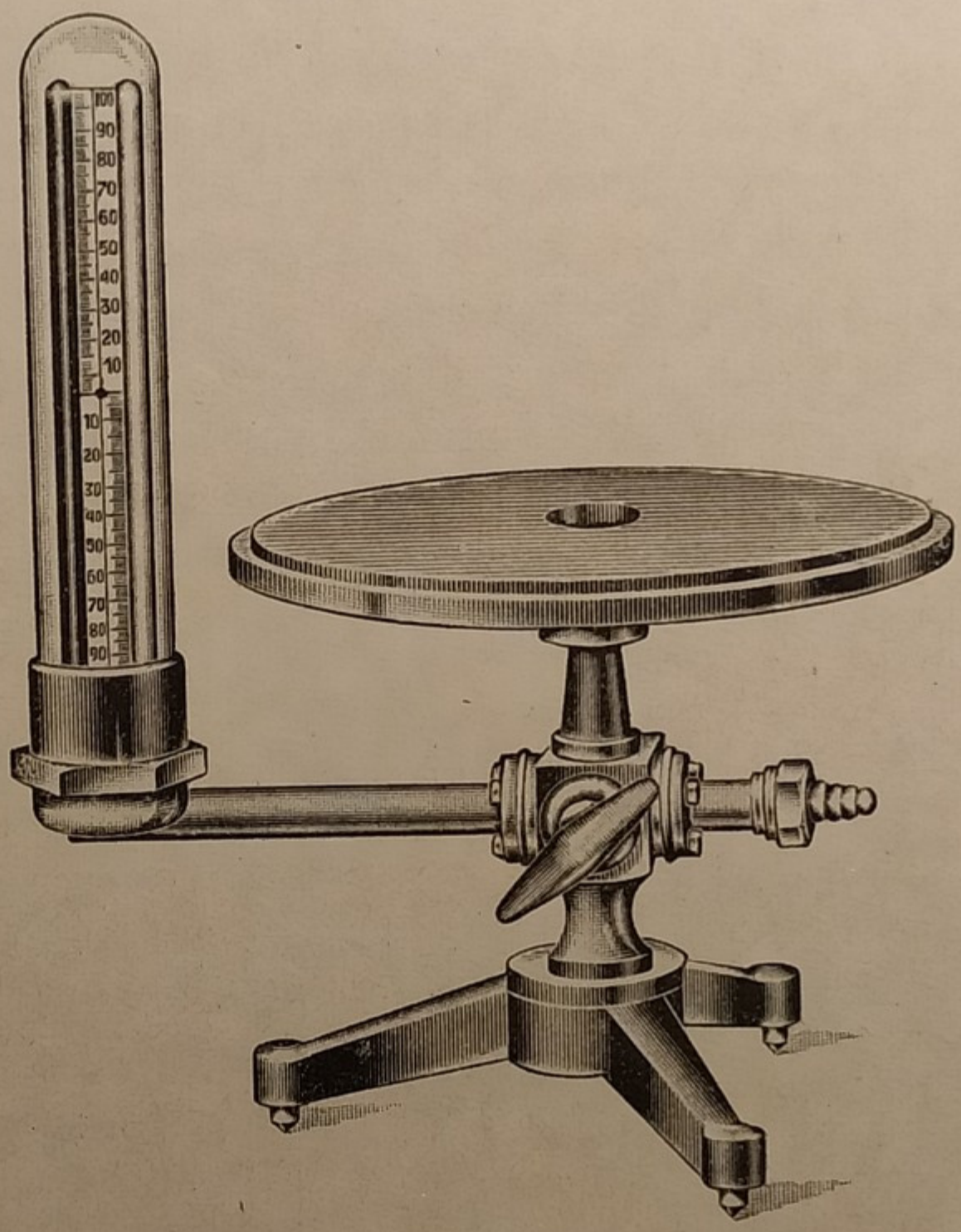

Fig. 187.

Il *provino* serve a misurare il grado di vuoto ottenuto. Esso è una specie di piccolo barometro tronco, ossia un tubo ad **U** lungo da 15 a 30 centimetri, con uno dei rami aperto e l'altro chiuso ripieno di mercurio. Il tubo è fissato ad una tavoletta divisa in millimetri, ed è chiuso dentro una provetta che comunica col condotto della macchina (fig. 187). Prima che la macchina entri in azione il mercurio riempie tutto il ramo chiuso e arriva solo verso il basso del ramo aperto; la pressione iniziale è infatti più che sufficiente a sostenere tale colonna di mercurio. Messa in azione la macchina, ad un certo momento, quando la diminuita pressione interna non è più capace di sostenere quella colonna, il mercurio si abbassa nel ramo chiuso e s'innalza nell'altro. Così potremo in ogni istante cono-

scere il valore della pressione interna, o, come si dice, il grado di rarefazione, esprimendola in *centimetri di mercurio* quant'è la differenza di livello misurata sulla scala divisa. Se si potesse estrarre tutta l'aria, la differenza di livello riescirebbe nulla; ma nel tipo di macchina descritto bisognerà accontentarsi quando la differenza di livello arriverà a qualche millimetro.

Il *piatto* della macchina è una spessa lastra circolare di vetro, fissata con ceralacca entro un piatto di bronzo, ben piana e ben smerigliata, il cui foro centrale comunica col condotto della macchina. La campana, che ha pure l'orlo inferiore ben piano e ben smerigliato, si appoggia semplicemente sul piatto dopo avere, come si disse, disteso qualche po' di sego sul suo bordo per ottenere una chiusura ermetica. Il foro centrale del piatto porta una filettatura che permette di avvitarvi dei particolari giunti, quando si vogliano vuotare dei recipienti di forme diverse. Fatto il vuoto, se si tratta di una campana, la pressione atmosferica la preme fortemente contro il piatto, sì che, ad esperienza finita, non si riescirebbe a staccarnela. Per poterlo fare agevolmente e senza rischio di rottura della campana, vi si fa rientrare l'aria per mezzo di un robinetto speciale.

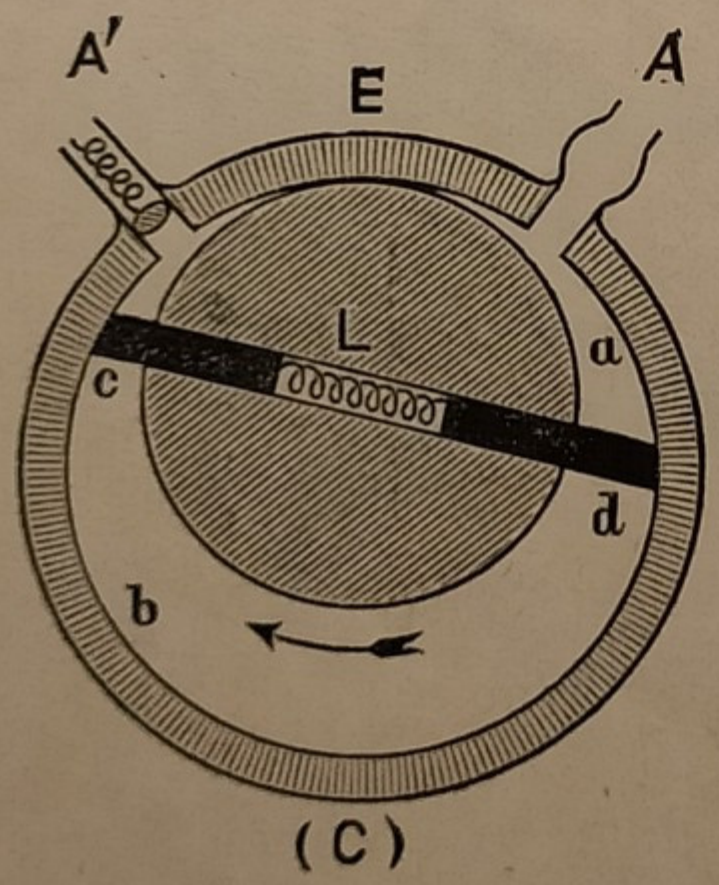

Fig. 188.

Il tipo di macchina pneumatica descritto non si usa più nell'industria e anche nei laboratori è oggi quasi del tutto sostituita da altre macchine più rapide e capaci di dare un vuoto assai più spinto. Diamo una breve descrizione di una *macchina rotativa di Gaede*.

Un involucro cilindrico C, porta due aperture A e A' (fig. 188), la prima comunicante col recipiente che si vuol vuotare, l'altra con l'atmosfera, ma munita di una valvola che si apre dall'interno verso l'esterno. Un cilindro pieno L gira intorno a un asse non coincidente con quello dell'involucro, ma in modo

che ruotando resta sempre a contatto con la parete interna dell'involucro verso la regione E che separa le due aperture. Due lastre metalliche $c\,d$ escono da un solco diametrale del cilindro e sono mantenute sempre a contatto con l'involucro per l'azione di apposite molle a spirale. Ruotando il cilindro nel verso della freccia, cresce lo spazio a e diminuisce quello b, ciò che provoca un richiamo d'aria da A e un'espulsione da A'. Il fenomeno ripetendosi in modo continuo, nel recipiente congiunto con A si può ottenere un rapido vuoto, che può raggiungere il valore di 1 millesimo di millimetro di mercurio.

55. Trombe. — Si chiamano così degli apparecchi ad azione continua che fanno l'ufficio di macchine pneumatiche o di compressori, mediante l'efflusso di un liquido.

Il principio delle trombe in genere e della *tromba ad acqua* in particolare, lo troviamo in un fenomeno descritto dal professor Venturi, fisico italiano, che visse dal 1746 al 1822.

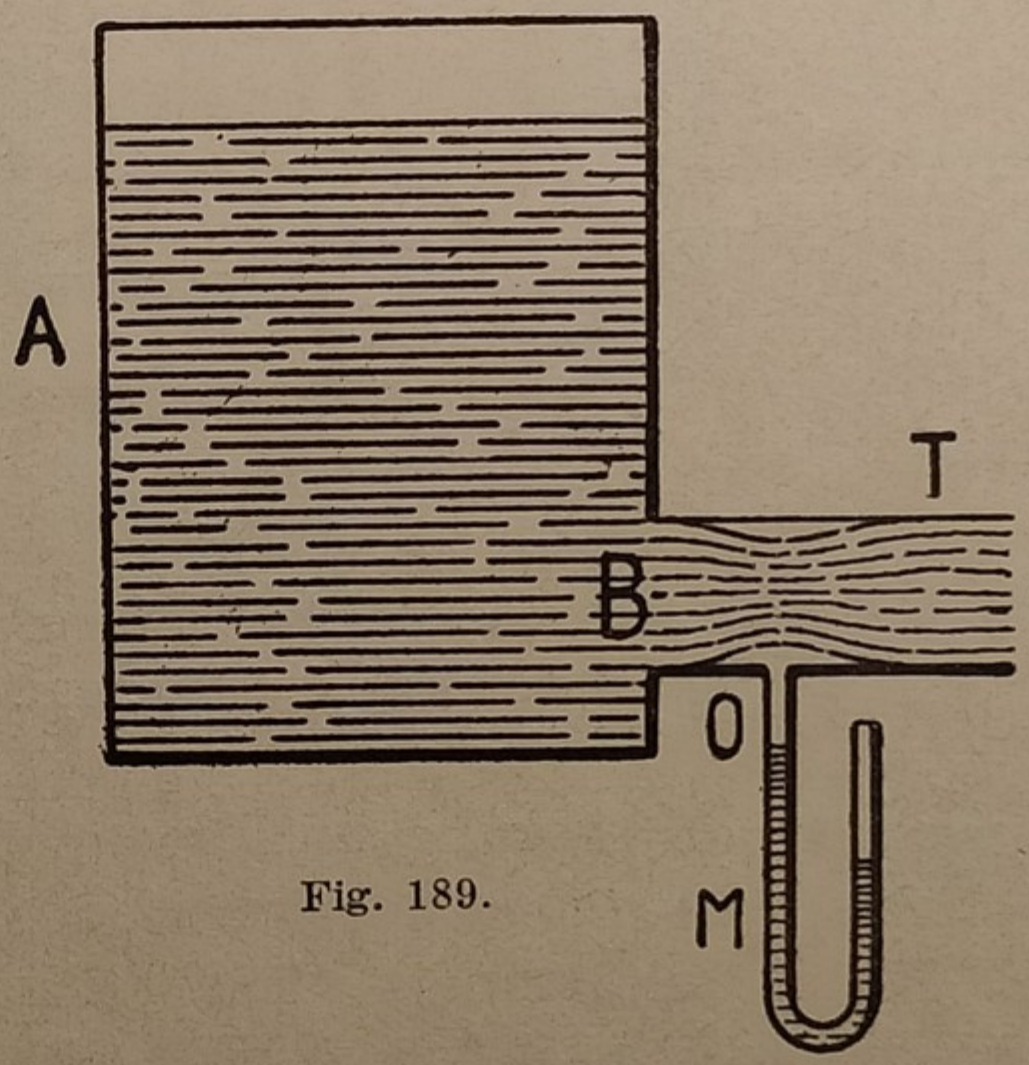

Fig. 189.

Da un recipiente A (fig. 189) si fa effluire l'acqua attraverso un foro B unito a un tubo di efflusso T. Si può facilmente constatare che la vena liquida, poco dopo B, si contrae e non occupa tutta la sezione del tubo. Attorno a quella contrazione si forma il vuoto, di modo che se si innesta in O un manometro M si rileva che la pressione interna è minore di quella esterna. E perciò se in O si aprisse un foro, non solo l'acqua non uscirebbe, ma l'aria esterna penetrerebbe nel tubo, e trascinata per adesione uscirebbe insieme col getto liquido per il tubo T.

Un modello di tromba ad acqua tutta in vetro è rappresentato dalla figura 190. L'acqua penetra per il tubo superiore *A* e il getto liquido insieme coll'aria richiamata dal tubo laterale, scende per il tubo inferiore *B*. In un recipiente unito al tubo laterale munito di robinetto, si può con grande facilità ottenere un vuoto fino a 2 o 3 centimetri di mercurio. L'apparecchio è notevole per la sua semplicità ed è di costo limitatissimo, e

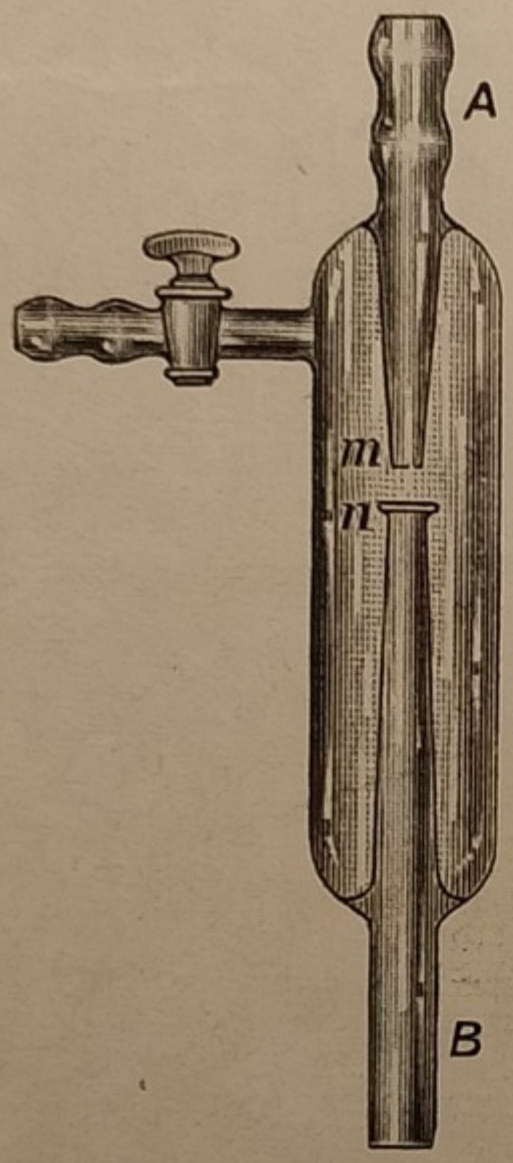

Fig. 190.

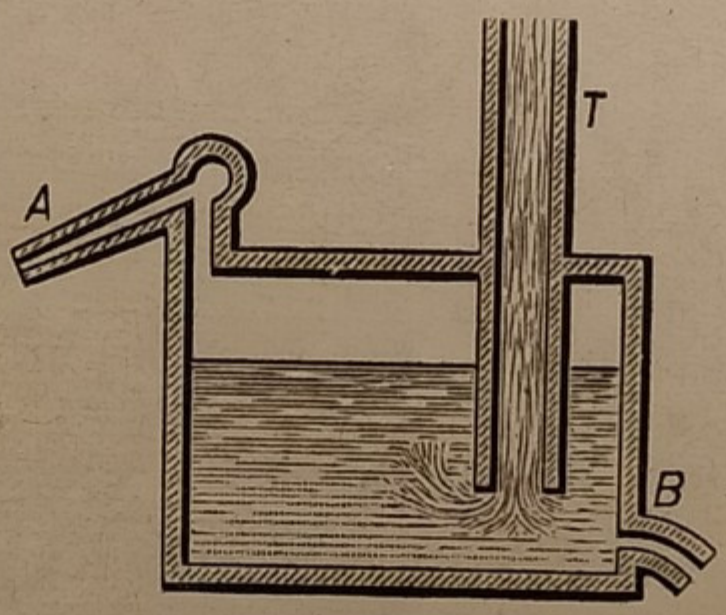

Fig. 191.

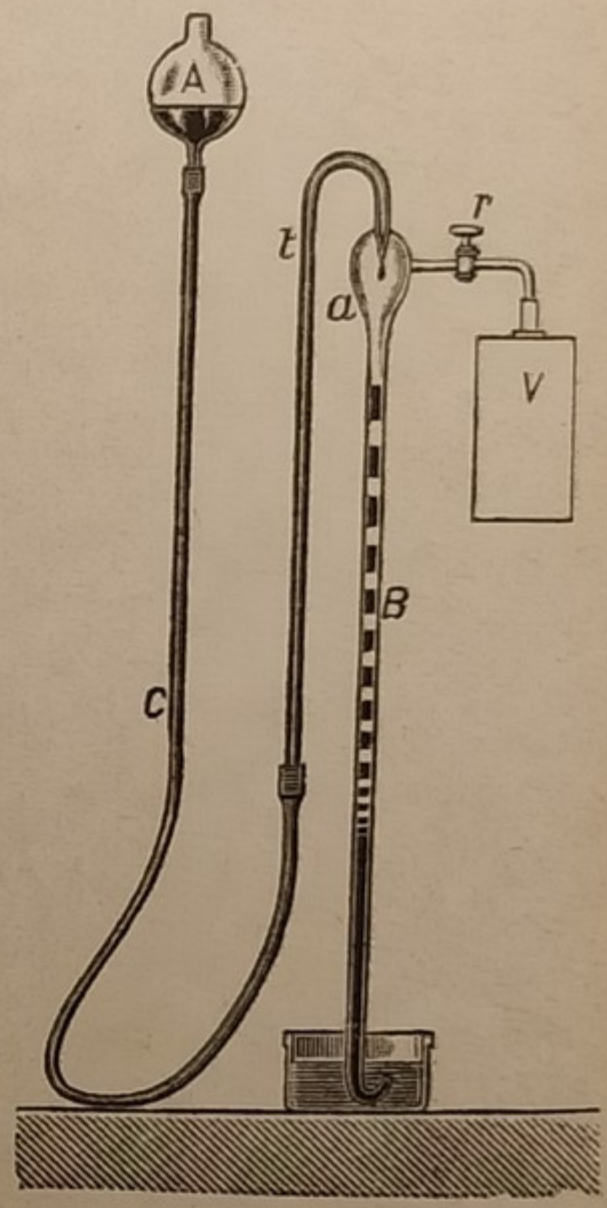

Fig. 192.

permette di eseguire una buona parte delle esperienze scolastiche sulla pressione atmosferica.

Spesso tale tromba viene utilizzata come tromba *soffiante*. In questo caso il tubo *T* di uscita della miscela acqua-aria si fa arrivare sul fondo di una scatola che vien detta *separatore* (fig. 191). In tal modo l'aria separata dall'acqua esce soffiando da *A*, e l'acqua si scarica per il tubo *B*.

La figura 192 rappresenta una tromba a mercurio. Il serbatoio *A* contenente il liquido viene sollevato in modo che il mercurio effluisca goccia a goccia dall'estremità di un tubo affilato che mette capo in una bolla di vetro *a* comunicante col recipiente *V* da vuotare, e penetra in un tubo verticale *B* di un diametro interno piuttosto piccolo, lungo circa 1 metro, saldato sotto

la bolla a. In tal maniera le successive goccie di mercurio si trasformano in piccole colonne tra le quali restano imprigionate delle bolle d'aria sottratte alla bolla a e quindi al recipiente V.

La velocità di efflusso del mercurio si modifica regolando l'altezza del serbatoio A, e il liquido viene raccolto in una bacinella inferiore dove pesca il tubo di caduta B. Con questa tromba si può ottenere un vuoto assai spinto; ma la sua azione è assai lenta; per accelerarla spesso se ne uniscono parecchie l'una di lato all'altra, comunicanti con lo stesso recipiente.

56. Applicazione delle macchine pneumatiche e dei compressori. — Le macchine pneumatiche servono nell'industria a diversi usi:

1° per fare il vuoto nelle lampade ad incandescenza e in tubi particolari per la produzione dei raggi X; a tale scopo si usavano prima delle pompe a mercurio, ma oggi esclusivamente speciali pompe rotative ad azione rapidissima;

2° per ottenere una rapida evaporazione e concentrazione degli sciroppi negli zuccherifici, o delle conserve di frutta, di pomodoro, ecc.;

3° per la spolveratura degli appartamenti; esistono infatti degli aspiratori di polvere ad azione molto rapida che tolgono la polvere anche attraverso la stoffa dei mobili e dei tappeti, e la accumulano in sacchi speciali con gran vantaggio dell'igiene.

I compressori sono anche più largamente usati. Senza accennare ai mantici ed ai ventilatori per le fucine e per gli organi delle chiese, diremo che l'aria compressa in robusti serbatoi viene frequentemente utilizzata:

1° per il lancio dei siluri; il siluro stesso compie il suo percorso mosso da un motore ad aria compressa che ha nel suo corpo.

2° per produrre un getto violento di sabbia allo scopo di pulimentare pezzi metallici, di spulire o decorare il vetro, ecc.

3° I freni dei treni per viaggiatori e molti tram cittadini funzionano con l'aria compressa.

4° Nelle grandi città, e anche nei grandi uffici, poste, telegrafi, banche, ecc. si usa la posta pneumatica. A tale scopo ci sono delle tubazioni metalliche di 6 o 7 cm. di diametro interno, nelle quali vengono poste delle scatole speciali, che richia-

mano per la loro forma i proiettili dei cannoni, le quali contengono le carte che si vogliono spedire da un luogo all'altro. La stazione di partenza lancia tali scatole immettendo nel tubo l'aria compressa di un serbatoio.

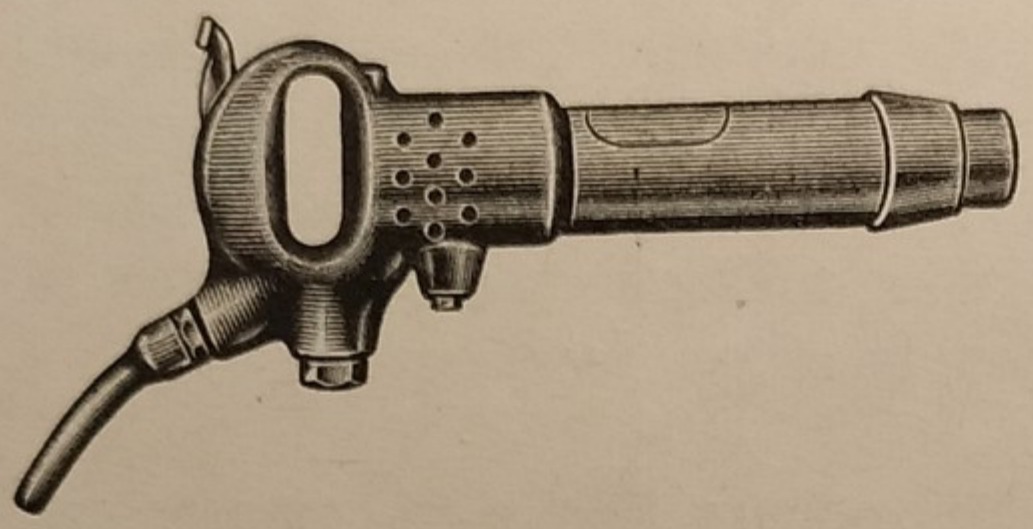

Fig. 193.

5° Per la liquefazione dei gas, come si dirà nella Termologia, si usano dei compressori.

6° L'aria compressa serve come forza motrice; è noto a tutti che nelle grandi gallerie delle nostre Alpi, a cominciare da quella del Cenisio, i fori delle mine vennero ottenuti con le perforatrici ad aria compressa, la quale servì anche a muovere i treni per lo sgombro del materiale scavato. Nelle officine sono in uso molti utensili ad aria compressa: magli, martelli, ecc.

La figura 193 mostra un martello ad aria compressa. È facile spiegarne il funzionamento riferendoci alla figura 194 che lo rappresenta in sezione. Premendo sulla leva *C*, la valvola *D* scende, e l'aria compressa, per il tubo *T* unito al serbatoio, arriva al condotto *b*. Quest'aria, attraverso le aperture *aa*, penetra nella camera *F* e spinge innanzi il pistone-martello *A* che colpisce la testa dell'utensile non rappresentato nella figura. Ma non appena le aperture *a* hanno oltrepassato l'imboccatura *c* del cilindro, l'ammissione dell'aria nella camera *F* cessa, e nello stesso tempo si verifica lo scappamento attraverso le stesse aperture *a* e l'apertura *d*. Essendo poi il pistone sempre circondato dall'aria compressa, tornerà indietro, e il fenomeno

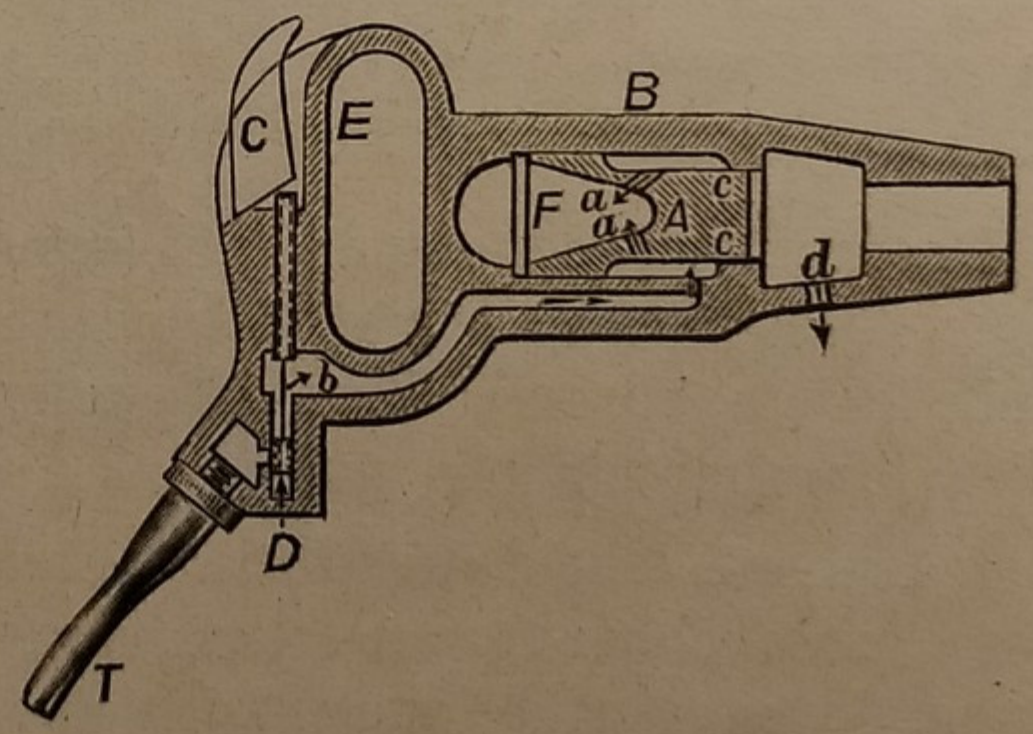

Fig. 194.

descritto si ripeterà indefinitamente, cioè per tutto il tempo che la leva *C* rimane abbassata.

57. Pompe idrauliche. — Servono particolarmente per sollevare un liquido o per travasarlo da un recipiente ad un altro.

La *pompa aspirante* (fig. 195) è formata di un largo tubo cilindrico con stantuffo. Questo porta uno o due fori passanti da parte a parte, chiusi da valvole che si aprono dal basso in alto; il corpo di pompa comunica mediante il *tubo d'aspirazione* con il serbatoio che contiene l'acqua da sollevare.

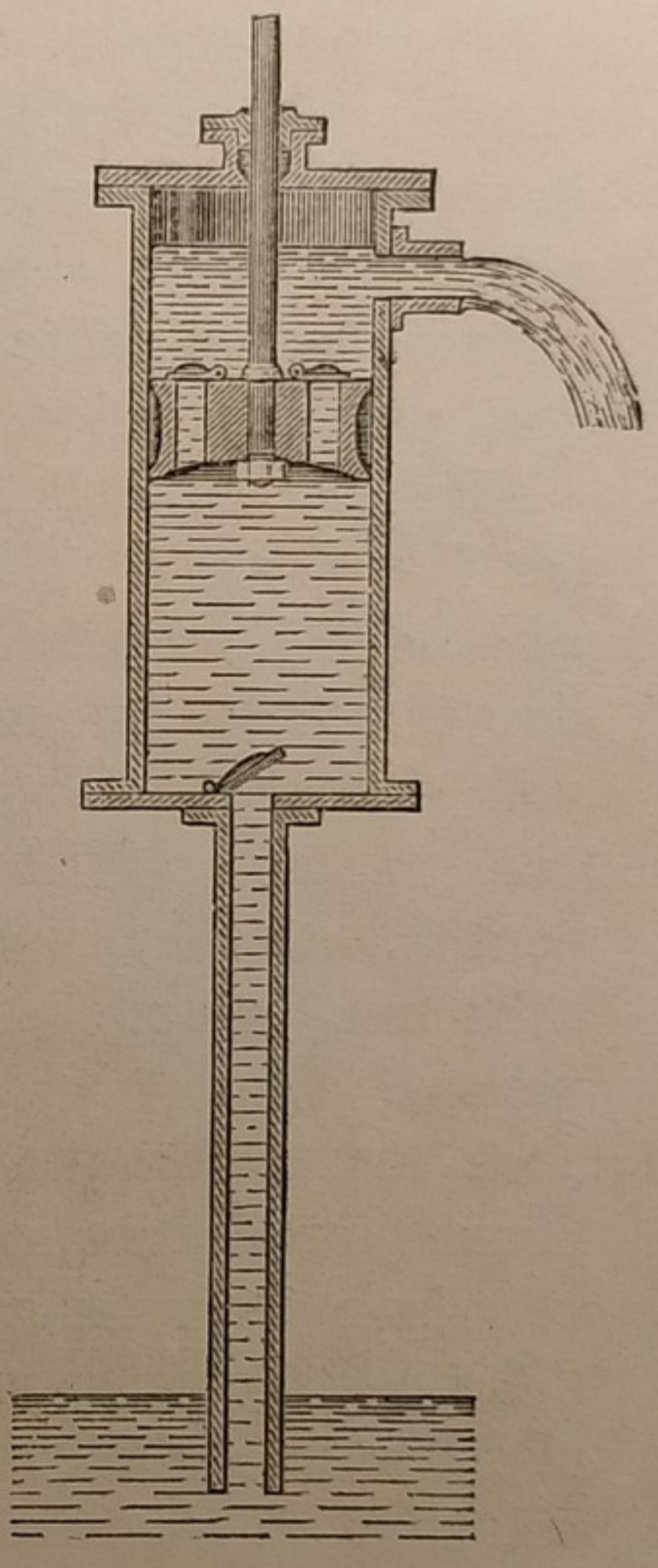

Fig. 195.

Alla sommità del tubo di aspirazione c'è una valvola che si apre dal basso in alto; un tubo di *efflusso*, munito talvolta di robinetto, è disposto lateralmente nella parte superiore del corpo di pompa.

La pompa funziona da principio come una macchina pneumatica. Prima di metterla in azione, lo stantuffo essendo *in basso*, l'acqua ha la stessa altezza nel tubo d'aspirazione e nel serbatoio. Sollevando lo stantuffo, al disotto di questo si forma il vuoto; le valvole *c c* restano chiuse per effetto del loro peso e della pressione atmosferica; la valvola inferiore si apre, spinta in su dall'aria del tubo d'aspirazione che ha da principio la pressione atmosferica: quest'aria entra nello spazio vuoto rimasto sotto lo stantuffo, e diminuisce di pressione perchè aumenta di volume. Una colonna d'acqua sale nel tubo, finchè la sua pressione aggiunta a quella dell'aria interna farà equilibrio alla pressione atmosferica che si esercita sopra la superficie libera del serbatoio.

Lo stantuffo essendo arrivato alla sommità della sua corsa la valvola inferiore si chiude per il suo peso e l'acqua resta sospesa nel tubo di aspirazione. Abbassando lo stantuffo, l'aria

che gli sta sotto viene compressa, finchè la sua pressione sorpasserà la pressione atmosferica tanto da sollevare le valvole dello stantuffo e sfuggire nell'atmosfera.

Dopo qualche colpo di stantuffo, l'acqua arriva alla valvola inferiore, la apre e penetra nel corpo di pompa. Allora la pompa è *adescata.*

Da quell'istante, continuando il moto regolare di salita e discesa dello stantuffo, ammesso che *la faccia inferiore dello stantuffo anche arrivato alla massima altezza, non si trovi a più di* $10^m,33$ *dal livello del serbatoio,* l'acqua segue lo stantuffo durante la sua salita e forma una colonna continua non essendoci più aria nel corpo di pompa.

Alla discesa dello stantuffo, la valvola inferiore si chiude per il suo peso, e l'acqua del corpo di pompa solleva le valvole dello stantuffo e vi passa sopra. Nel movimento successivo di ascesa, rimanendo chiuse le valvole, l'acqua viene sollevata e versata all'esterno dal tubo superiore.

A partire dall'istante in cui l'acqua riempie il corpo di pompa, ad ogni colpo di stantuffo, effluisce dal detto tubo un volume d'acqua uguale al volume del corpo di pompa.

Si tenga dunque presente che in una pompa aspirante l'acqua può salire solo ad un'altezza che faccia equilibrio alla pressione atmosferica che si esercita sull'acqua del serbatoio. Ciò è chiaro se si pensa che una pompa anche perfetta può al massimo produrre il vuoto perfetto sopra l'acqua che sta nel tubo di aspirazione; in tal modo la pompa col suo tubo di aspirazione costituirebbe un vero e proprio barometro ad acqua. Se pertanto il barometro a mercurio segna 76^{cm}, l'altezza dell'acqua è, come è noto, $76^{cm} \times 13,59 = 1033$ cm. circa; tale è dunque l'altezza teorica a cui l'acqua può salire. Cosicchè una pompa sarà senza effetto se il tubo di aspirazione avrà un'altezza, contata dal pelo dell'acqua del serbatoio, che superi tale valore. In pratica il tubo di aspirazione raramente arriva a 8 metri.

La pompa aspirante completa, come spesso viene usata per attingere l'acqua dai pozzi, è rappresentata nella figura 196.

Nella *pompa premente* non c'è tubo di aspirazione, poichè il corpo di pompa è *annegato*, cioè la valvola d'aspirazione è al disotto del pelo dell'acqua nel serbatoio. Il tubo per il quale l'acqua viene innalzata parte lateralmente dal basso del corpo di pompa e porta ivi una valvola *c* aprentesi dall'interno verso

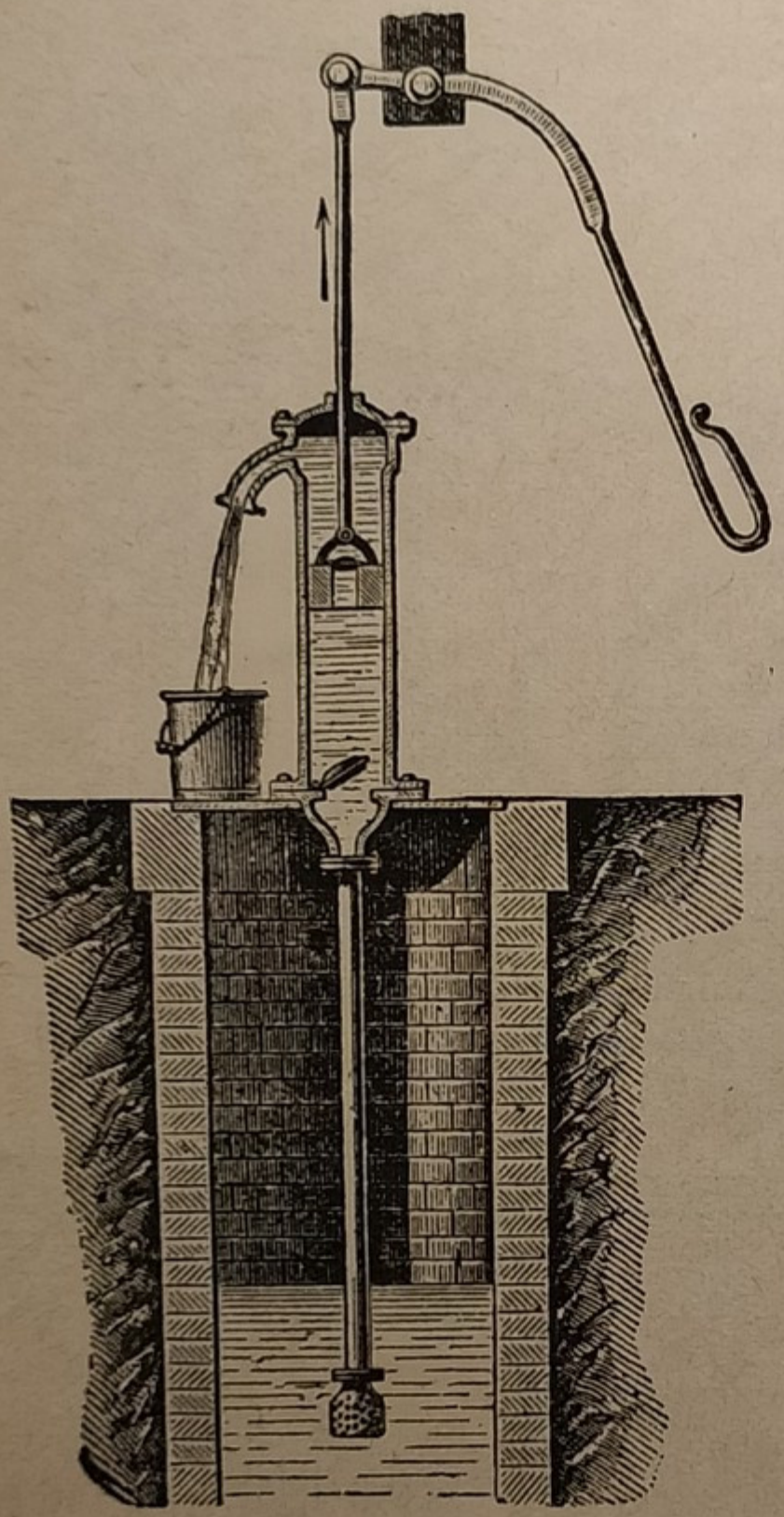

Fig. 196.

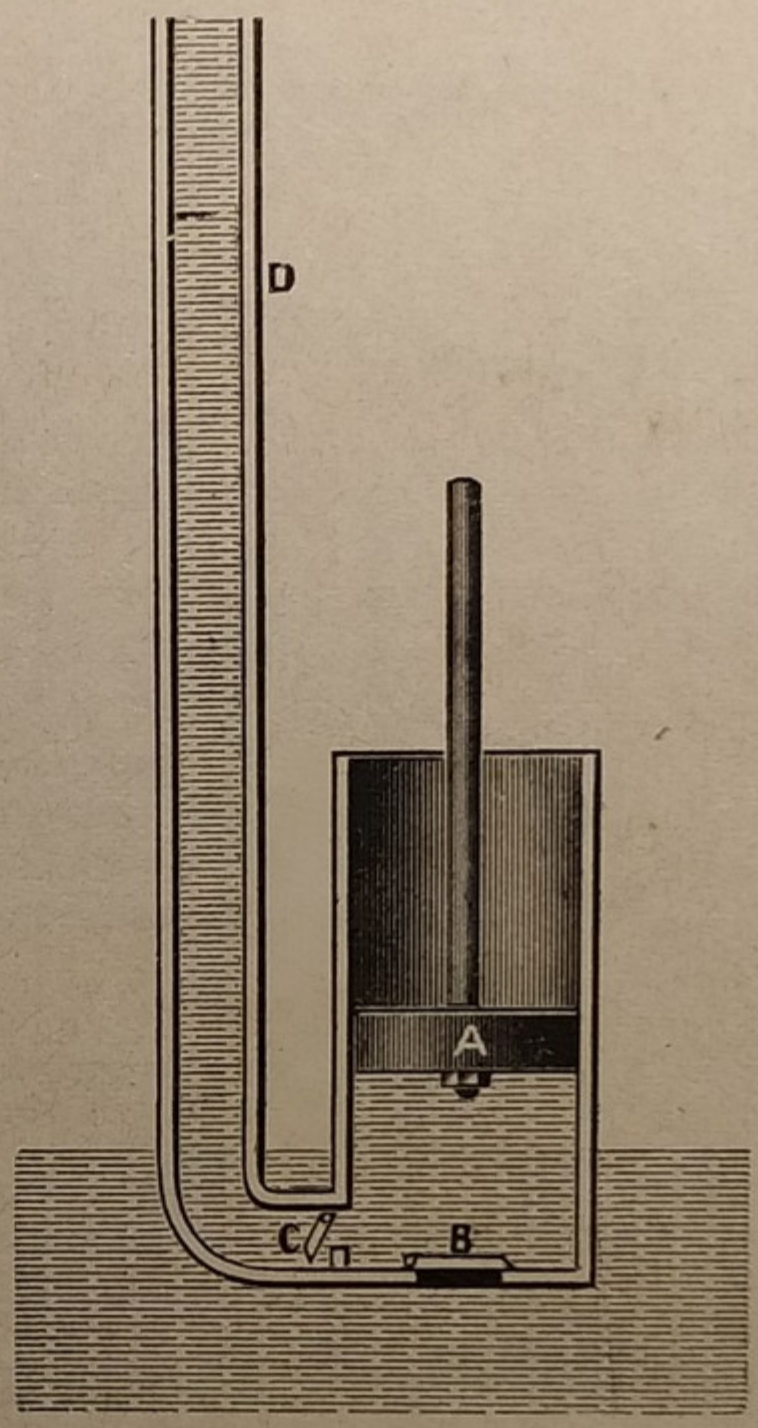

Fig. 197.

l'esterno (fig. 197). Il pistone è *cieco*, cioè senza valvola, dimodochè, quando s'innalza, al di sotto di esso tende a formarsi il vuoto e quindi la pressione atmosferica e in parte anche la pressione idrostatica fa entrare l'acqua nel corpo di pompa. Quando lo stantuffo, arrivato in alto, si arresta, la valvola di aspirazione si chiude per il suo peso; l'acqua interna resta così isolata da quella esterna e all'abbassarsi dello stantuffo apre la valvola laterale e viene spinta ad una certa altezza nel tubo di ascesa.

L'altezza a cui l'acqua può arrivare in tale tubo non ha limite, ma dipende solo dalla forza che si può esercitare sopra lo stantuffo nella sua discesa.

Nella *pompa da incendi*, ancora usata quando si deve utilizzare l'acqua di un fosso, di un fiume, si trovano accoppiate due pompe, come nella macchina pneumatica a due cilindri, di modo che mentre l'una si riempie l'altra si vuota. Le aste dei due stantuffi sono articolate con una doppia leva a cui si im-

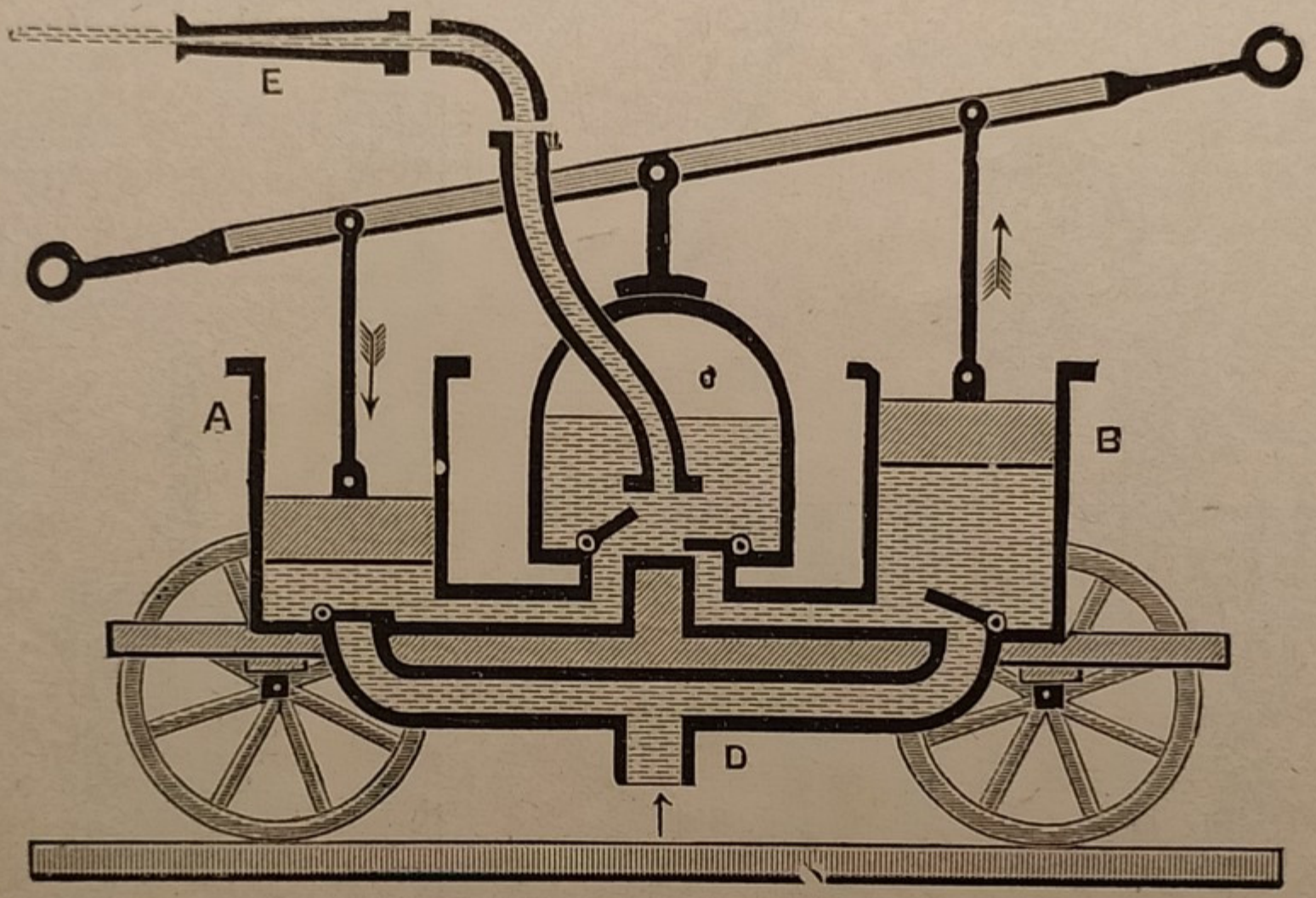

Fig. 198.

prime un movimento alternativo (fig. 198). I tubi laterali dei due corpi di pompa sono assai brevi e sboccano in un recipiente intermedio *C* chiuso, pieno di aria, detto *camera d'aria*. Le due pompe prendono l'acqua da un tubo *D* che pesca in un serbatoio portatile che viene riempito d'acqua versandovela spesso con delle secchie. Il tubo di ascesa *E* penetra nella camera d'aria fino in basso; in tal modo il getto d'acqua diventa continuo. Infatti, l'acqua immessa nella camera d'aria, sollevandovisi, vi comprime il gas, e dopo qualche colpo di stantuffo comincia l'efflusso dal tubo di ascesa, e il getto risulta continuo per effetto dell'aria che preme continuamente sull'acqua.

La figura 199 riproduce la *pompa aspirante e premente*, nella quale il corpo di pompa porta uno stantuffo cieco e un tubo di aspirazione che pesca nell'acqua del serbatoio, con la solita valvola di aspirazione sul fondo. Lateralmente, in basso, è innestato il tubo di ascesa con la rispettiva valvola, come si ha nella pompa premente (fig. 196).

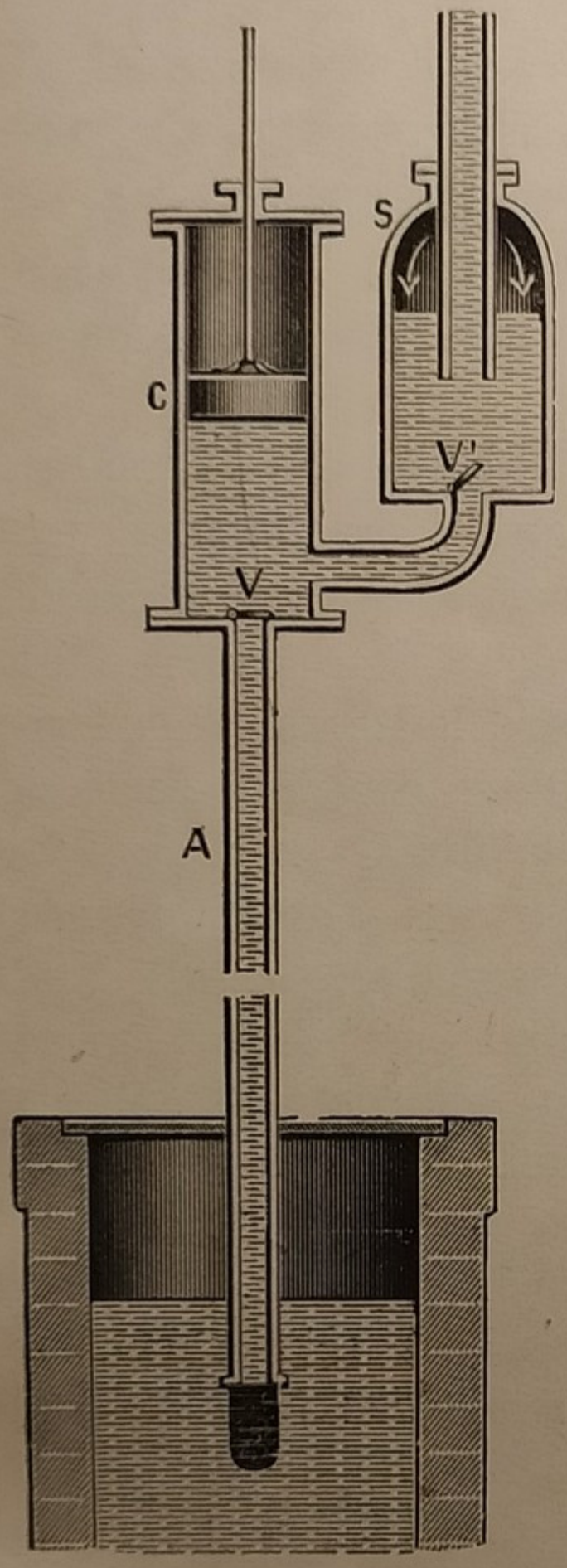

Fig. 199.

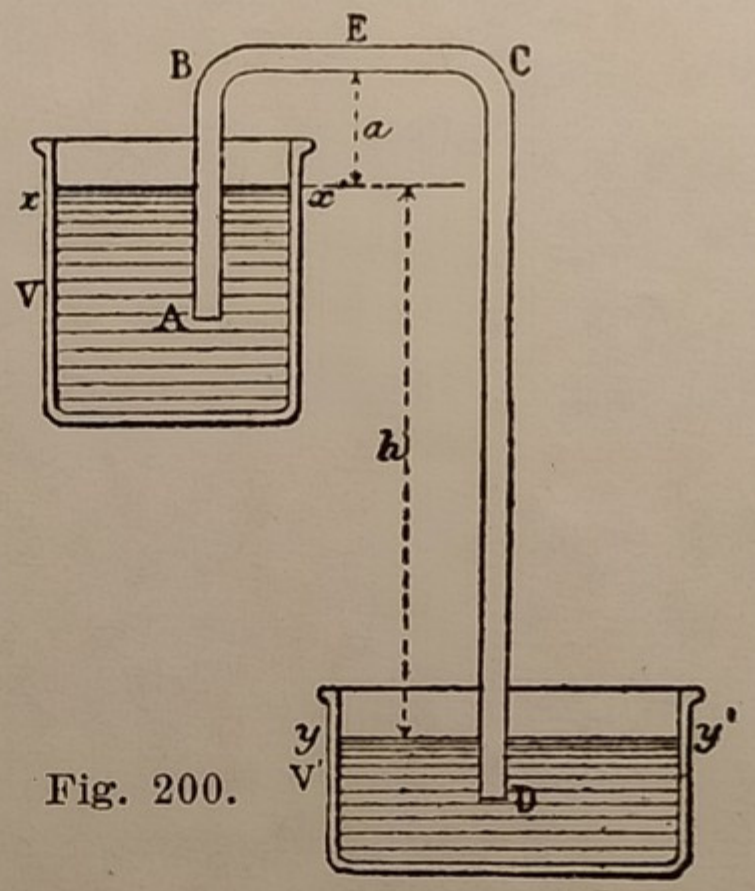

Fig. 200.

In tal modo l'acqua entra nel corpo di pompa, come avveniva nella pompa aspirante e all'abbassarsi dello stantuffo viene fatta salire come nella pompa premente.

Fra gli apparecchi destinati a produrre il movimento di un liquido annoveriamo infine anche il *sifone*. È un tubo ricurvo ad **U** rovesciato con due rami di lunghezza diversa (fig. 200). Il recipiente V che si vuol vuotare è posto più in alto di quello V' che deve ricevere il liquido. Si fa pescare il ramo più corto nel recipiente più alto e l'altro in quello più basso; *adescato* il sifone, cioè riempitolo del liquido che si vuol travasare, si ha senz'altro il travasamento.

Infatti, supponiamo che nel vertice del sifone — vertice la cui altezza dalla superficie libera del liquido nel recipiente

più basso non deve essere superiore a $10^m,33$ se si tratta di acqua — si trovi una membrana E che otturi il tubo (fig. 200). Le due parti del sifone ABE, DCE essendo piene di liquido, questo vi rimane sospeso dalle due parti per effetto della pressione atmosferica, in luogo di cadere per il proprio peso. La faccia sinistra della lamina divisoria E sopporta una pressione $H - a$, quella di destra una pressione $H - (a + h)$, essendo H la pressione atmosferica misurata in colonna del liquido in questione. La differenza è h ed è diretta da sinistra verso destra.

Se ora si immagina di togliere la lamina divisoria, si produrrà per tal ragione un movimento di liquido da sinistra verso destra, per tutto il tempo in cui rimarrà attiva una pressione in quel senso. Il passaggio del liquido da V a V' ha per effetto di diminuire l'altezza h, e quando tale grandezza divenisse zero, cioè quando il liquido nei due vasi fosse alla stessa altezza, il movimento cesserebbe; in tal condizione i due vasi V e V' costituirebbero un sistema di vasi comunicanti col liquido in riposo alla stessa altezza.

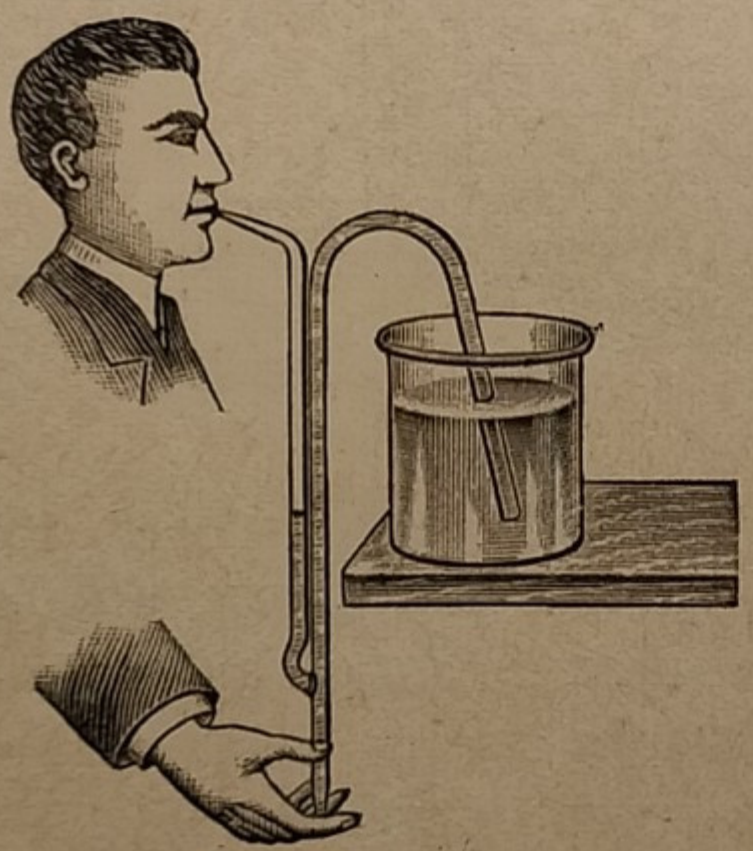

Fig. 201.

Riassumendo quindi, per il funzionamento del sifone occorre: 1° che il livello nel vaso V sia più alto che nel vaso V'; 2° che la pressione atmosferica mantenga pieno il sifone.

L'adescamento del sifone si fa spesso immergendo il ramo corto nel liquido da travasare e aspirando per l'altra estremità. Se il liquido è corrosivo, il sifone è munito di un tubo particolare per l'aspirazione (fig. 201).

58. Teorema di Torricelli sull'efflusso dei liquidi. — Esso dice che *la velocità di efflusso di un liquido da un piccolo foro, praticato in un ampio recipiente, è la stessa che acquisterebbe un*

corpo pesante cadendo dalla superficie libera del liquido sul piano orizzontale passante per l'orifizio.

Trascuriamo la dimostrazione razionale del teorema, che si può fare coi principî noti della Meccanica, e limitiamoci a farne delle applicazioni.

Se dunque è h la distanza tra la superficie libera del liquido e il piano orizzontale passante per l'orifizio, la velocità v di efflusso sarà:

$$v = \sqrt{2gh} .$$

E se S è la sezione dell'orifizio, il volume V di liquido che effluisce ad ogni secondo, ossia la *portata*, *è* Sv ossia:

$$V = S\sqrt{2gh} .$$

Ciò però vale solo nell'ipotesi che la vena liquida uscente dall'orifizio si mantenga cilindrica, mentre invece sappiamo che essa subisce una contrazione (55); dimodochè la portata reale è inferiore a quella teorica calcolata colla formola precedente. Per avere la portata reale basta che S rappresenti la sezione minima della vena contratta.

59. Cenni sulle misure di velocità e di portata. — La velocità dei diversi filetti di un liquido che scorre in un canale o in un tubo, è variabile; nulla per quelli che si trovano a immediato contatto delle pareti, cresce verso l'interno; quindi non è molto semplice il calcolo della portata.

Nel caso di un canale, caso massimamente importante per la tecnica, con appositi apparecchi (mulinello di Woltmann, tubo di Darcy, ecc.) si misura la velocità a diverse profondità lungo varie verticali, e coll'uso di formole, riportate negli appositi manuali, si calcola la velocità media v_m in metri al secondo. Se S è l'area in metri quadrati della sezione retta del canale dove vennero eseguite le misure delle varie velocità, la portata V in metri cubi è chiaramente:

$$V = Sv_m .$$

Quando non si richieda una grande esattezza, ci si limita a misurare, mediante un semplice galleggiante gettato sull'acqua, la velocità v_s alla superficie, e si ritiene:

$$v_m = 0{,}8\, v_s.$$

60. Moto di un solido in un fluido (navi, dirigibili, velivoli). — Già s'è parlato (33) della resistenza che oppone l'aria ai corpi che vi si muovono; la resistenza, per ragione della maggiore densità, è anche più grande nei liquidi, ma segue analoghe leggi. L'esperienza inoltre ha dimostrato che quando un corpo si muove in un fluido si formano in questo dei filetti in movimento particolare; così nella figura 202 sono rappresentate le linee di corrente delle particelle fluide, provocate da una sfera S che si muove da A a B. La figura 203 dà la forma di tali correnti intorno alla sezione di un'ala piana inclinata

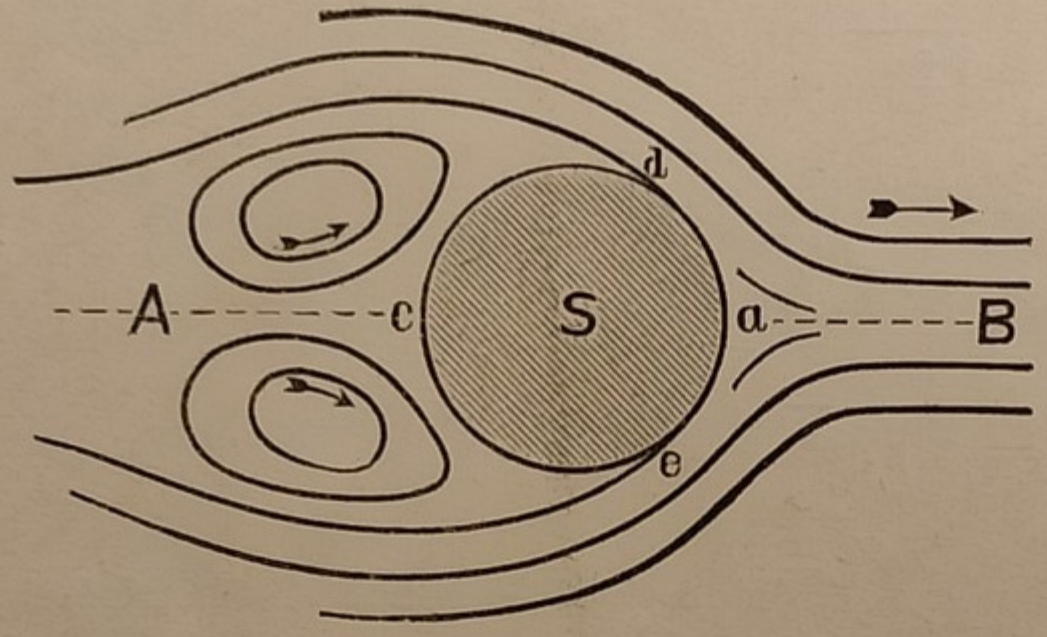

Fig. 202.

rispetto alla direzione del moto. In tutti i casi, dietro al corpo tende a formarsi un vuoto, da cui nascono dei movimenti vorticosi in quella regione. Ne segue che sulla parte anteriore del corpo si ha una pressione maggiore di quella posteriore e la differenza delle due pressioni è cagione della resistenza offerta dal fluido e ne dà la misura. Sui corpi oblunghi, a parità di altre circostanze, la resistenza è minore che sui corpi sferici. In proposito però certi risultati sperimentali sono abbastanza curiosi: un

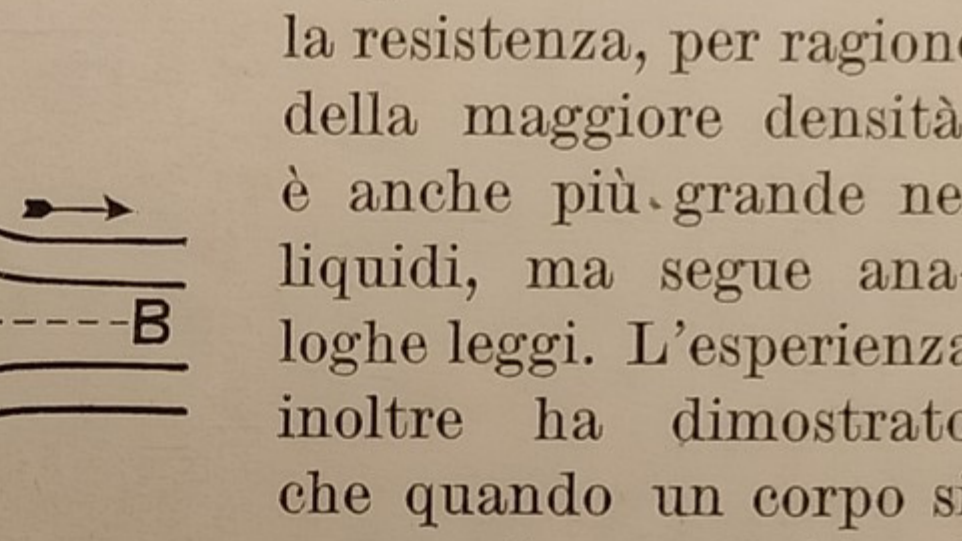

Fig. 203.

corpo come quello disegnato nella figura 204 che si muove nella direzione del suo asse, trova minor resistenza quando si muove colla parte rotonda in avanti. La natura in ciò aveva indicato la soluzione all'uomo, che la trovò solo dopo laboriosi tentativi. La maggior parte dei pesci presenta dopo una testa assai larga un corpo affilato verso la coda. Navi, dirigibili, velivoli ripetono spesso tale disposizione, che si verifica anche nella sezione delle ali dei velivoli stessi. Gli apparecchi citati, le navi parzialmente immerse nell'acqua, i dirigibili e gli aeroplani nell'aria, hanno come organo propulsore una o più eliche mosse da potenti motori. Nelle grandi navi, in causa della grandissima resistenza offerta dall'acqua, i motori possono superare in potenza i 100 mila cavalli.

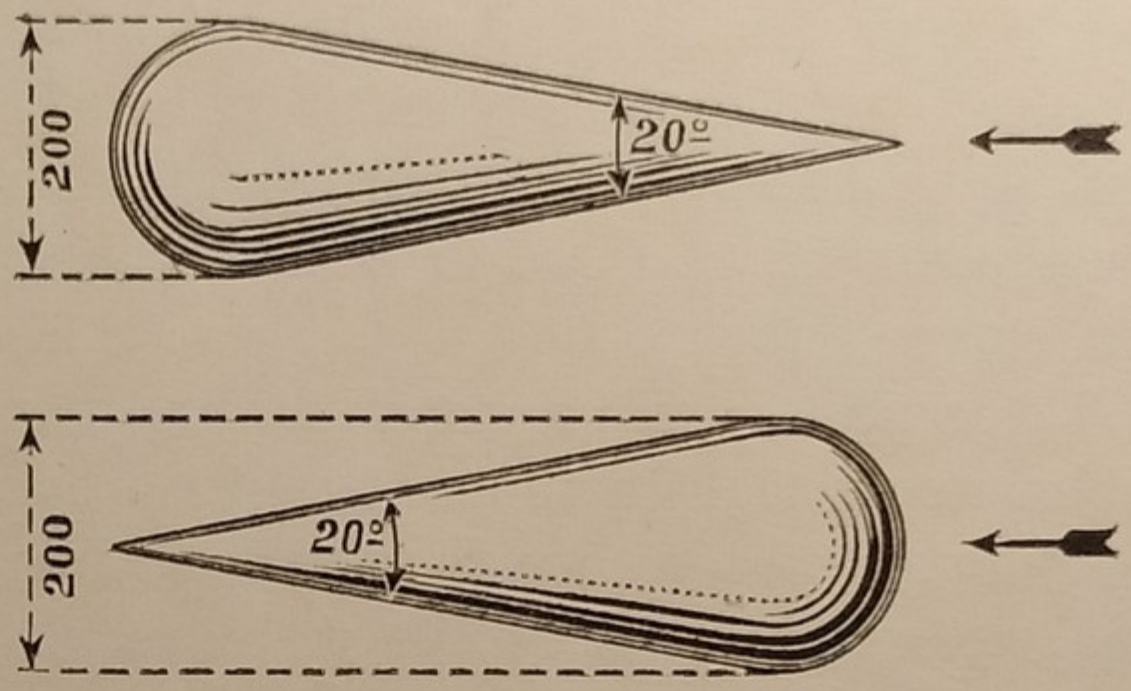

Fig. 204.

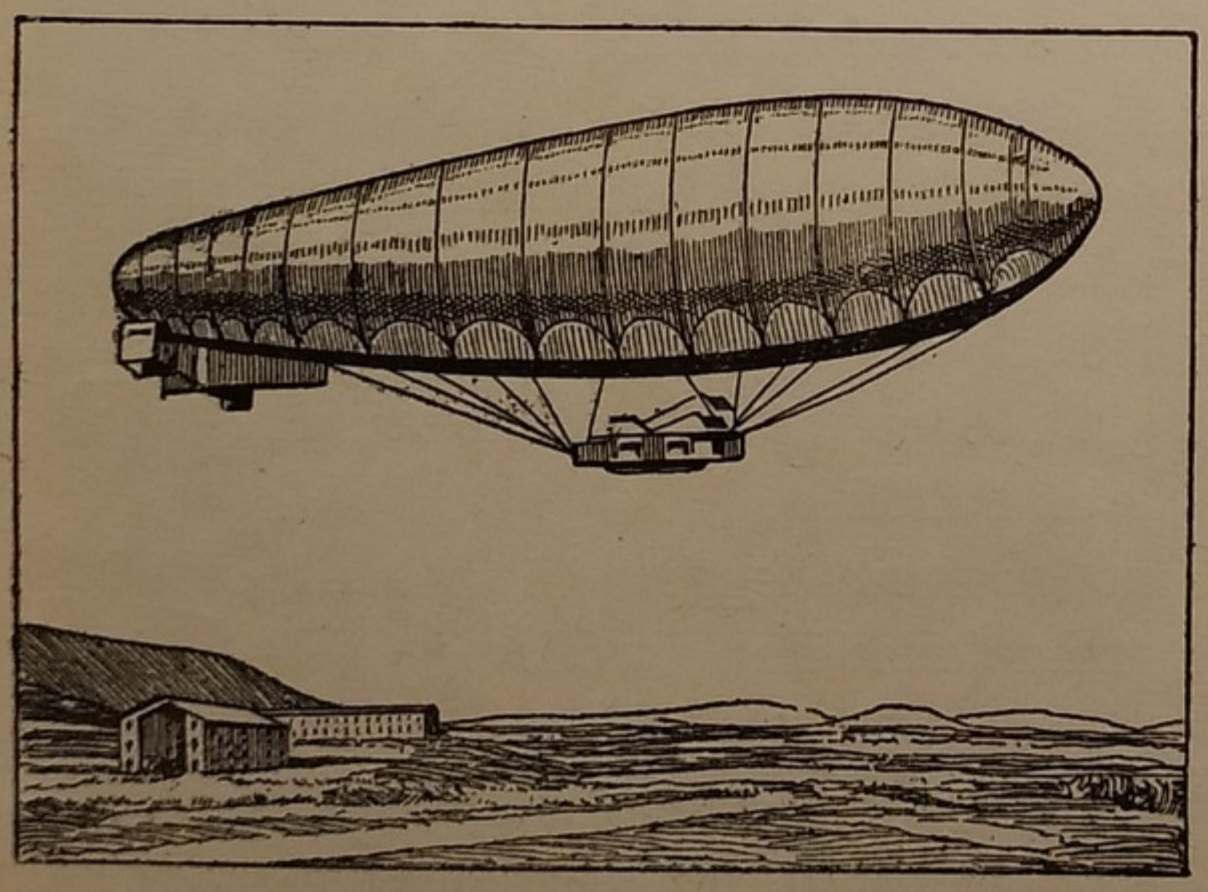

Fig. 205.

I dirigibili hanno un peso più o meno eguale alla spinta che ricevono dall'aria per il principio di Archimede; ma possono assumere per effetto dell'elica e di organi speciali — i timoni — un moto in qualsiasi direzione.

Quest'elica fa avanzare il pallone nella direzione dell'asse di rotazione, e perchè il movimento sia il meno possibile con-

trastato dalla resistenza dell'aria, si dà al dirigibile la forma allungata di un fuso o di un pesce (fig. 205).

L'aria però essendo raramente calma, affinchè il dirigibile possa muoversi in una direzione qualunque, anche contro vento, occorre che il motore possa imprimergli una velocità notevole; ma il problema non differisce meccanicamente da quello di una barca che, a forza di remi o di un motore, si muove sopra un corso d'acqua.

I dirigibili sono formati di un involucro esterno che avvolge una serie di palloni riempiti di idrogeno o di elio. Questo ultimo gas ha un peso specifico circa doppio dell'idrogeno, ma ha il grande vantaggio su quest'ultimo di non essere combustibile, vantaggio enorme se si pensa al pericolo di incendio o di scoppio che presentano i palloni riempiti con idrogeno. L'elio è ora prodotto in grande quantità negli Stati Uniti d'America.

All'involucro, con sistemi più o meno rigidi, è unita la navicella allungata, che comprende i motori per le eliche, capaci di imprimere al dirigibile una velocità che può rendersi a volontà anche maggiore di quella del vento, nel caso che il dirigibile sia costretto a muoverglisi contro. A tale scopo il motore deve essere potente e nello stesso tempo leggero, in modo che non si richieda per sollevarlo una grande forza ascensionale e quindi involucri di grande cubatura, il che aumenterebbe enormemente la resistenza dell'aria.

La mancanza di un motore leggero e potente ritardò per molto tempo la soluzione del problema della dirigibilità.

Nella navicella poi trovano posto diversi organi di comando, alcuni dei quali agiscono sui *timoni di direzione*, sul tipo di quelli delle navi, atti a orientare in piano orizzontale l'asse del dirigibile, e sui *timoni di profondità*, che son piani di tela girevoli intorno ad assi orizzontali, che servono a orientare l'asse del dirigibile in piano verticale.

L'*aeroplano* o *velivolo* è un apparecchio più pesante dell'aria, e il principio della sostentazione è dinamico, come avviene nel cervo volante.

Un aeroplano si compone: 1° d'una intelaiatura di legno leggero, detta *fusoliera*, che forma il corpo dell'apparecchio; 2° di due sistemi di timoni; 3° di grandi ali di tela, tese su armature di legno fissate alla fusoliera, e formanti le *superficie sostentatrici*; 4° d'un motore che fa girare l'elica.

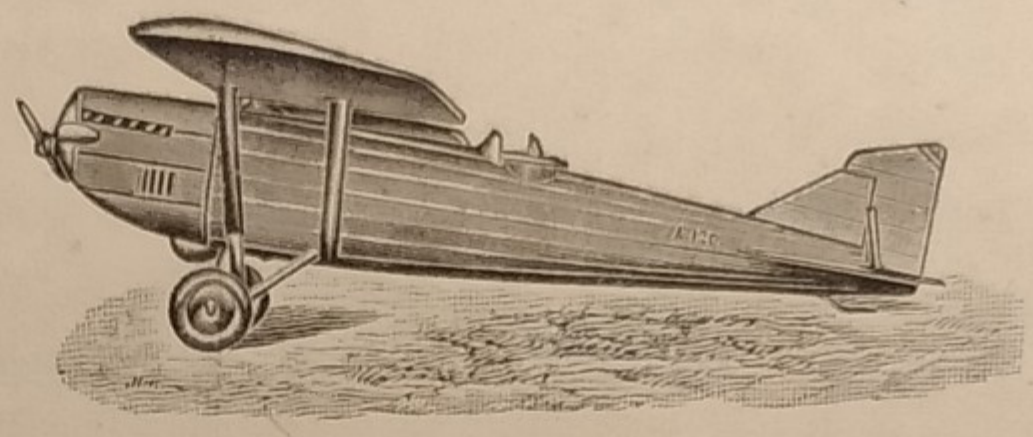

Fig. 206.

Si chiama *monoplano* (fig. 206) l'aeroplano che ha due sole ali disposte lateralmente l'una all'altra, come le ali di un uccello; il *biplano* (fig. 207) possiede due serie di ali sovrapposte.

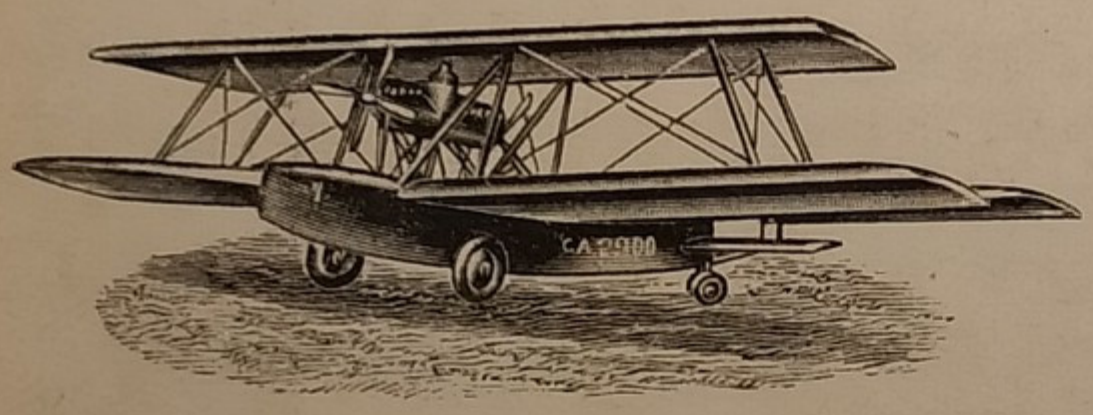

Fig. 207.

Per prendere il volo l'apparecchio è montato su ruote, per solito due innanzi e una indietro più bassa; così poggia sul terreno. Messo in moto il motore, l'elica gira, e la forza motrice fa correre l'aeroplano sul suolo come fosse un'automobile. Contemporaneamente avviene che la *pressione dell'aria contro la superficie obliqua delle ali sostentatrici* aggiunge un movimento verticale a quello orizzontale, sicchè dopo un percorso di qualche decina di metri, la forza sostentatrice supera il peso e l'apparecchio s'innalza gradualmente.

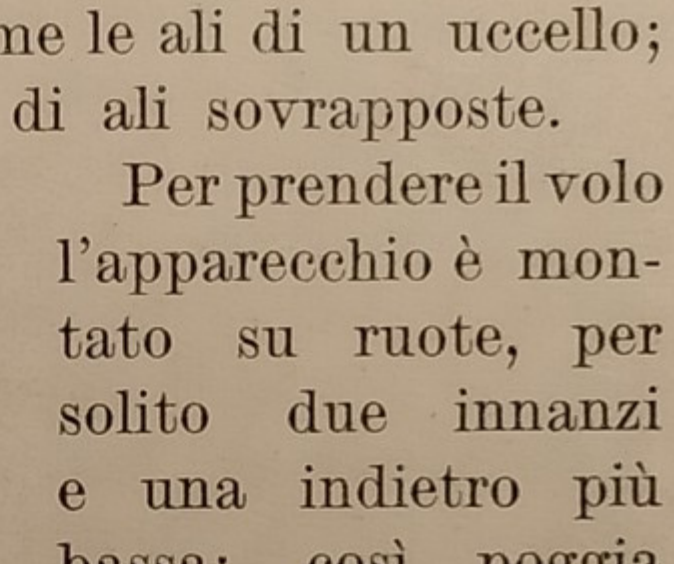

Fig. 208.

Quando il pilota arresta il motore, l'apparecchio discende per effetto del suo peso, cioè scivolando sull'aria con dolce pendenza fino ad atterrare.

Per comprendere il meccanismo della sostentazione possiamo riferirci alla figura 208.

Le ali sono in essa rappresentate dal segmento MN, inclinato sull'orizzonte di un angolo φ, detto *angolo d'attacco*;

e la forza propulsiva con cui agisce il motore è rappresentata da *f*. Così lo strato d'aria che è in contatto immediato con la faccia anteriore delle ali, si comprime, e in parte sfugge dai bordi delle ali stesse, in parte vi esercita contro una forza *R* perpendicolare applicata in un punto *O*, detto *centro di pressione*, situato al di sopra del centro di gravità. Scomponiamo la forza *R* in due, una *H* orizzontale e l'altra *V* verticale. La prima — *forza ritardatrice* — si oppone all'avanzamento, e la seconda — *forza sostentatrice* — tende a sollevare l'aeroplano, il che avviene quando la velocità di traslazione del medesimo ha raggiunto un conveniente valore.

In volo orizzontale la componente *V* è uguale al peso dell'apparecchio e la componente orizzontale *H* è eguale alla forza orizzontale *f* del propulsore; perchè ciò si verifichi la velocità dell'apparecchio deve mantenere un determinato valore. Se la velocità cresce, le forze suindicate crescono, in particolar modo la *V* supera il peso e l'apparecchio s'innalza; il contrario si verifica per una diminuzione della velocità.

Riguardo all'angolo d'attacco φ va osservato che la componente ritardatrice *H* diminuisce diminuendo tale angolo, quindi si capisce che al diminuire dell'angolo φ diminuisce anche la forza *f* che serve a vincere la forza *H*, ossia diminuisce il consumo di energia che il motore deve sviluppare. È questo il *principio delle piccole inclinazioni* seguìto nella costruzione pratica degli aeroplani; infatti in essi le ali sono quasi orizzontali.

Ad ogni modo anche qui, come nei dirigibili, la questione più importante risiede nell'uso di un motore potente e leggero; caratteristiche che finora sono possedute soltanto dal motore a scoppio.

Diamo infine un cenno degli *aerostati*. Sono formati di un involucro contenente un gas più leggero dell'aria, e che possono innalzarsi in virtù del principio di Archimede. Un aerostato comprende tre parti principali: 1° il *pallone*, 2° la *navicella*, 3° la *rete* che riunisce insieme le due parti (fig. 209).

Il pallone è un sacco di stoffa di seta, d'ordinario sferico, ricoperto di vari strati di vernice impermeabile. Nella sua parte inferiore l'involucro porta un'apertura circolare, alla quale è

unita una manica cilindrica di stoffa, formante un tubo per gonfiare il pallone. Si usa idrogeno o gas illuminante. Nella parte superiore trovasi una *valvola* comandata da una funicella che è a portata di mano dell'areonauta.

La *navicella* è una cesta di vimini, destinata a contenere gli aeronauti e gli accessori: barometro, termometro, bussola, il canapo-guida, l'àncora d'arresto e la zavorra formata da sacchetti di sabbia. La navicella è sospesa al pallone mediante corde attaccate a una rete a larghe maglie, che avvolge l'emisfero superiore del pallone, e ne ripartisce la carica su tutta la superficie.

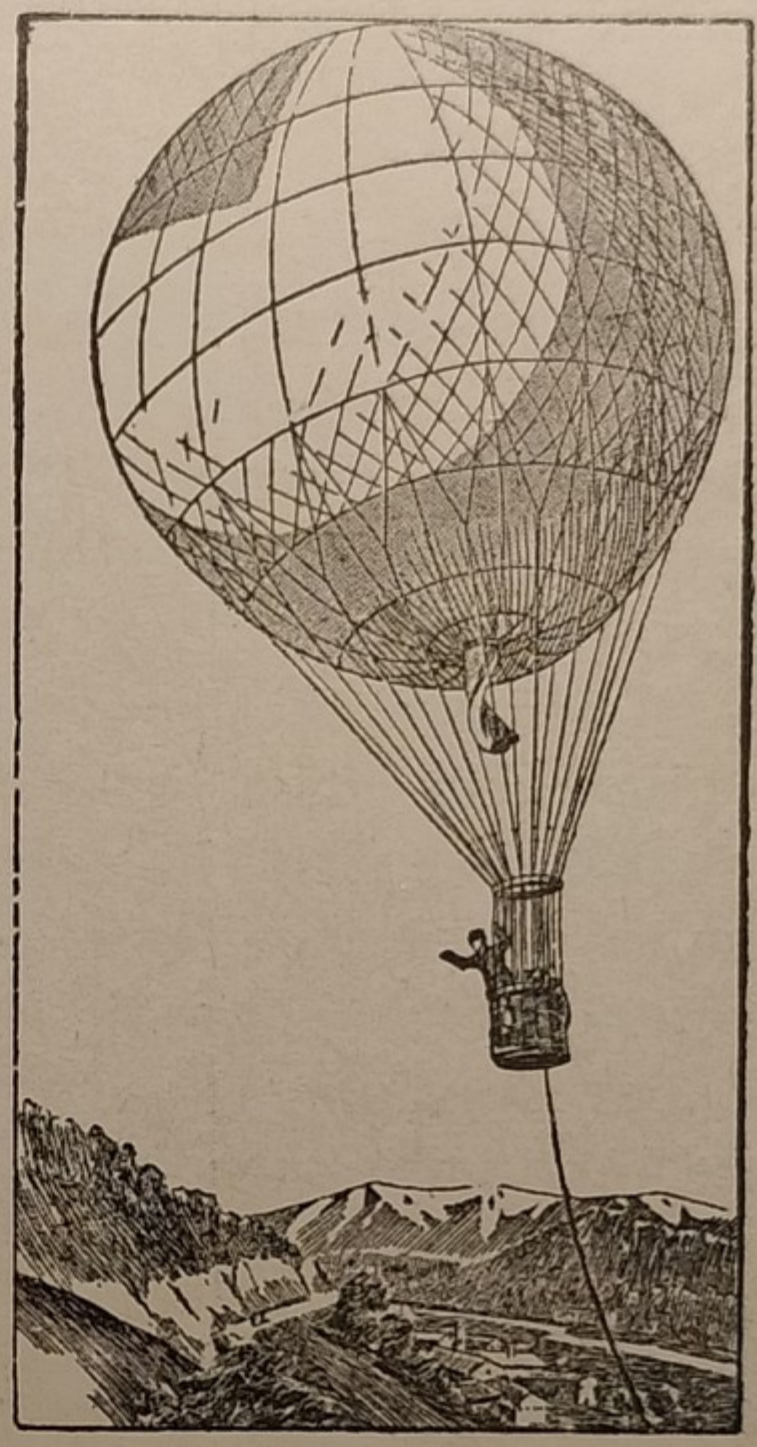

Fig. 209.

Ogni aerostato è soggetto a due forze: 1° il *peso* P, dell'involucro, del gas interno e della navicella col carico; 2° la *spinta* P', eguale al peso dell'aria spostata. La *forza ascensionale* è la differenza $P' - P$.

La forza ascensionale alla partenza si può facilmente calcolare: si tratti, ad esempio, di un pallone del volume di 1000 metri cubi pieno d'idrogeno. Un metro cubo di questo gas pesa, nelle condizioni normali, kg. 0,089, sicchè il peso di tutto l'idrogeno è:

$$1000 + 0{,}089 = 89 \text{ kg.}$$

Il peso dell'aria spostata:

$$1000 \times 1{,}293 = 1293 \text{ kg.}$$

Se si chiama P'' il peso complessivo dell'involucro, della navicella, ecc., la forza ascensionale sarà kg.:

$$1293 - (89 + P'').$$

Perchè il pallone possa innalzarsi la forza ascensionale deve essere positiva, cioè deve essere:

$$1293 - (89 + P'') > 0;$$

ossia:

$$P'' < 1204 \text{ kg.}$$

Mano a mano che il pallone s'innalza, per la diminuita pressione esterna, il gas tende ad espandersi e potrebbe acquistare una pressione da far scoppiare l'involucro se questo fosse completamente chiuso. Ma la manica che ha servito a gonfiare il pallone resta aperta e dà libera uscita all'eccesso di gas interno.

Si comprende che la forza ascensionale va diminuendo coll'altezza in causa della diminuita densità dell'aria, dimodochè quando il pallone ha raggiunto la zona di equilibrio, non s'innalza ulteriormente, e può essere soltanto trasportato orizzontalmente dal vento.

Per raggiungere una maggior altezza, l'aeronauta getta della zavorra; per moderare l'ascesa o per discendere, diminuisce la spinta, aprendo, per mezzo della fune che la comanda, la valvola che sta nella parte superiore del pallone. Con ciò del gas esce, il volume del pallone diminuisce e con esso diminuisce la spinta

Il *canapo-guida* è una corda di circa 100 metri, avvolta a matassa ed attaccata a fianco della navicella. Svolgendo la corda fino a farla trascinare sul suolo, il pallone, liberato del peso della parte del canapo che si appoggia sul terreno, cessa di discendere e si pone in equilibrio; nè può salire, perchè il suo peso aumenterebbe del tratto di corda sollevato. In tali condizioni l'aerostato continua il suo moto orizzontalmente per effetto del vento, e lo sfregamento della corda sul terreno ne rallenta il movimento.

Una importante applicazione degli aerostati la abbiamo nei *palloni frenati*, detti anche *drachen* — palloni drago —. Essi sono tenuti prigionieri mediante un cavo di acciaio, ed hanno reso, durante l'ultima guerra, dei segnalati servizi di osservazione. L'osservatore, che sta nella navicella, domina

col suo occhio il terreno che gli sta davanti, e rimane in continua comunicazione col suolo mediante il telefono. I palloni sferici, che si usavano prima della guerra, resistono male ai forti venti che talora li abbattono e sempre imprimono loro

Fig. 210.

delle oscillazioni dannose per le osservazioni, perciò si è dato a tali apparecchi (fig. 210) certe forme che alla prova si son mostrate più adatte alla immobilità richiesta per l'esattezza delle osservazioni. Per facilitare poi l'orientamento del pallone, esso porta dietro un organo che fa l'ufficio della coda del cervo volante. È esso una specie di saccoccia in forma di un segmento di anello fissata alla parte terminale posteriore.

Azioni molecolari.

61. Coesione e adesione. — Si ammette che fra le molecole dei corpi si eserciti una mutua attrazione, detta *coesione*, che, molto grande nei solidi, è debole nei liquidi e debolissima nei

gas. La coesione è una forza che si oppone all'allontanamento delle molecole, e ciò appare manifesto anche in molti fatti comuni, come nelle goccie che rimangono sospese alle foglie degli alberi, e nelle goccie d'acqua che rotolano sopra un pavimento polveroso, o in quelle di mercurio posate sopra una lastra di vetro, che conservano la forma sferoidale, quantunque sollecitate dalla gravità.

Oltre a ciò, tra le molecole di un corpo e quelle di un altro poste assai vicine, cioè, come si dice comunemente, a contatto, si manifesta pure una mutua attrazione, detta *adesione*.

Coesione e adesione vengono chiamate forze o *azioni molecolari*, e *fenomeni molecolari* quelli che ne derivano.

Tali forze producono effetti sensibili soltanto a distanze piccolissime, circa 1 micron, ma si manifestano con una intensità rilevante.

62. Adesione fra solidi, fra solidi e gas e fra solidi e liquidi. — Se si prendono due dischi di vetro perfettamente piani e finemente smerigliati e si fanno scorrere l'uno contro l'altro, comprimendoli sì da scacciare l'aria interposta, essi rimangono uniti. Il sistema essendo sospeso ad un supporto, occorre applicare un peso P abbastanza rilevante per separarli (fig. 211). L'esperienza riesce egualmente nel vuoto, perchè la loro aderenza non deriva dalla pressione atmosferica.

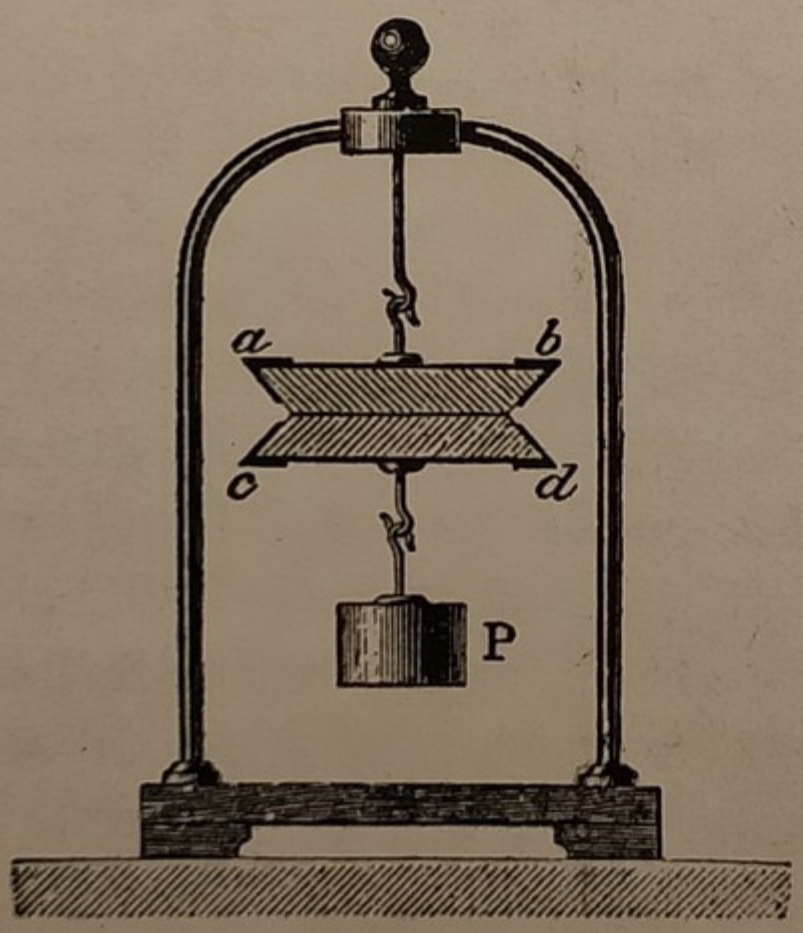

Fig. 211.

Per tal fatto nelle fabbriche di lastre di vetro, s'interpongono dei fogli di carta fra le lastre sovrapposte per evitare l'adesione, che non permetterebbe di separarle facilmente senza pericolo di rottura.

Altre esperienze comprovanti l'adesione fra i solidi sono quelle che qui sotto esponiamo.

Dopo aver tagliata ben in piano con un rasoio una sfera di piombo, premendo subito una contro l'altra le superficie brillanti delle due metà, prima che abbiano tempo di ossidarsi, si osserva che i due pezzi aderiscono fortemente.

Passando al laminatoio una foglia d'oro e una d'argento sovrapposte, le superficie della duplice lamina restano fortemente unite come se fossero saldate.

Certe limature metalliche sottoposte a forti pressioni si riuniscono in un lingotto così compatto come lo si può ottenere colla fusione.

I filtri non vanno considerati come semplici stacci; essi riescono a trattenere per *adesione* dei corpuscoli aventi dimensioni assai più piccole dei pori.

La tintura delle stoffe, delle pelli, ecc., è una operazione che *modifica la tinta* per effetto d'una *adesione meccanica* della materia colorante, le particelle della quale attaccate alle fibre possono non venire asportate colla lavatura.

L'*adesione fra solidi e gas* è provata dal fatto che solidi porosi, quali il carbone di legno, assorbono una grande quantità di gas e lo trattengono imprigionato nei loro pori.

La *spugna di platino* assorbe una notevole massa d'idrogeno e lo sviluppo di calore dovuto alla diminuzione di volume del gas assorbito, fa arroventare la spugna, sì che l'idrogeno può esserne acceso. Tal principio veniva utilizzato in certi accendilume che furono in voga prima della scoperta dei fiammiferi.

Tutti i solidi, immersi in un gas, si ricoprono d'una sottile guaina gassosa che difficilmente si può staccare, e che portano con sè anche movendosi, come la Terra nel suo moto trascina con sè la propria atmosfera.

Per provare l'*adesione fra solidi e liquidi* si equilibra un disco di vetro, sospeso sotto un piatto della bilancia idrostatica, e lo si mette a contatto con la superficie libera dell'acqua posta in un bicchiere sottostante. Il disco aderisce contro la superficie liquida, sì che occorre caricare alcuni pesi sull'altro piatto per staccarlo. Il fenomeno si riscontra anche se il liquido non bagna il disco, com'è il caso del mercurio,

Una bacchetta di vetro immersa nell'acqua ed estrattala, porta con sè sospesa una goccia liquida all'estremità inferiore. Il liquido che tocca direttamente il vetro vi aderisce, il resto rimane sospeso per la coesione del liquido.

63. Diffusione, osmosi, dialisi. — Disponendo l'un sopra l'altro due liquidi *miscibili*, ad esempio, dell'alcool sopra l'acqua, i due liquidi penetrano lentamente l'uno nell'altro per *diffusione*. L'esperienza, meglio che coll'acqua e l'alcool, si può eseguire facendo arrivare sul fondo di una provetta contenente dell'acqua, mediante una pipetta, una soluzione di solfato di rame. Malgrado che tale soluzione sia più densa dell'acqua, si osserva che lentamente la colorazione azzurra si innalza progressivamente.

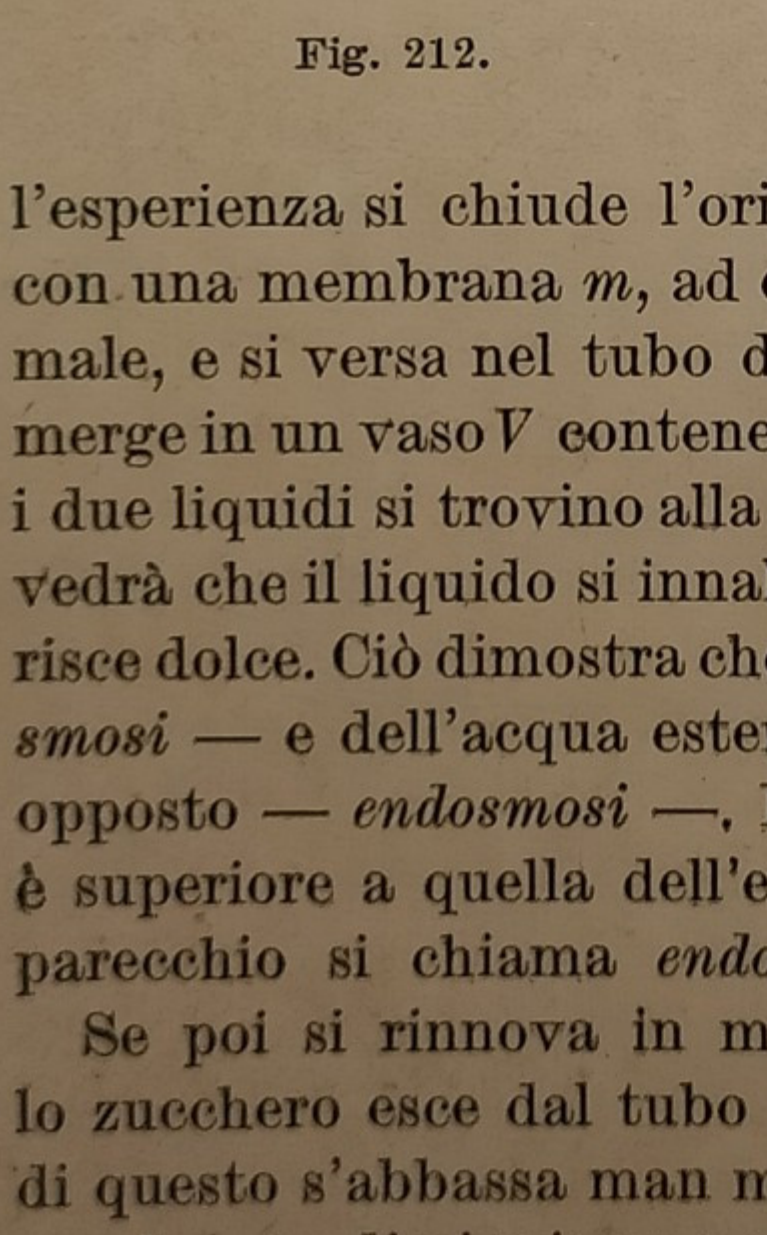

Fig. 212.

Quando due liquidi miscibili siano separati da una membrana che venga bagnata da almeno uno dei liquidi, essi si diffondono attraverso la membrana stessa. Per fare l'esperienza si chiude l'orifizio inferiore di un tubo di vetro T con una membrana m, ad esempio, con un pezzo di vescica animale, e si versa nel tubo dell'acqua zuccherata. Il tubo T s'immerge in un vaso V contenente acqua pura (fig. 212), in modo che i due liquidi si trovino alla stessa altezza; dopo qualche tempo si vedrà che il liquido si innalza nel tubo T e l'acqua esterna apparisce dolce. Ciò dimostra che l'acqua zuccherata passa fuori — *esosmosi* — e dell'acqua esterna attraversa la membrana in senso opposto — *endosmosi* —. La velocità dell'endosmosi dell'acqua è superiore a quella dell'esosmosi dell'acqua zuccherata. L'apparecchio si chiama *endosmometro*.

Se poi si rinnova in modo continuo l'acqua esterna, tutto lo zucchero esce dal tubo T, e il livello del liquido nell'interno di questo s'abbassa man mano che la concentrazione dell'acqua zuccherata diminuisce; e si arriva all'eguaglianza dei due livelli

quando i liquidi dalle due parti della membrana assumono la stessa composizione.

I corpi che attraversano più veloci una membrana sono le sostanze cristallizzabili o *cristallòidi*. Le sostanze dette *collòidi*, quali la colla, l'albumina, la gelatina, e simili, vi passano assai lentamente. Su tal fatto è fondata la *diàlisi*, che si opera mediante il *dializzatore* (fig. 213). In un vaso di vetro *v*, il cui fondo *p* è di *carta pergamenata*, si versa una mescolanza di una sostanza cristalloide e di una colloide, ad esempio, zucchero e gomma arabica, sciolte in acqua.

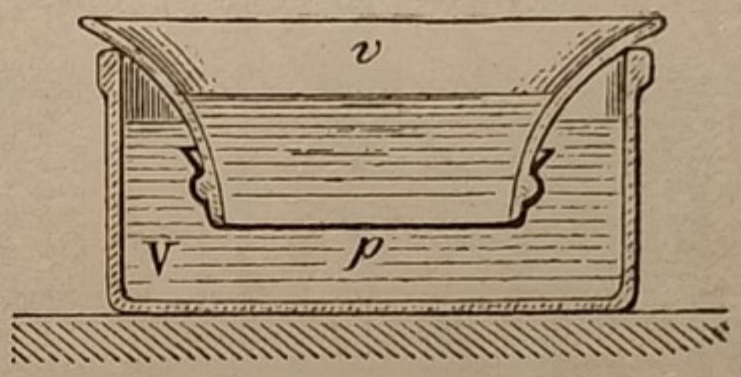

Fig. 213.

Questo vaso lo si immerge in un altro *V* contenente acqua pura. Lo zucchero passa attraverso la membrana e resta disciolto nell'acqua esterna, mentre il colloide non passa. Rinnovando l'acqua del vaso *V* tutto il cristalloide viene asportato.

Negli organismi viventi si trovano spesso dei liquidi miscibili, separati da membrane che sono bagnate, e però i fenomeni di osmosi si incontrano frequenti e hanno una notevole importanza nei processi di assimilazione e di eliminazione.

64. Pressione osmotica. — Vi sono certe membrane che si lasciano traversare solo dal solvente, per es. l'acqua, e non dalle sostanze disciolte; vengono dette *semipermeabili*. Si possono preparare nel seguente modo: un vaso poroso da pila viene riempito di una soluzione al 3% di ferrocianuro potassico, e lo si immerge in una soluzione al 3% di solfato di rame.

Le due soluzioni si muovono in senso opposto attraverso le pareti del vaso, e incontrandosi nell'interno, formano un precipitato continuo di ferrocianuro di rame, che nello spessore delle pareti forma una specie di pellicola che ha il carattere indicato.

Se si riempie il vaso così preparato con una soluzione acquosa di zucchero, all'apertura ben chiusa si adatta un tubo sottile munito di graduazione e lo si immerge in un vaso *A* conte-

nente acqua pura (fig. 214), questa attraversa la membrana e il liquido sale notevolmente nel cannello graduato fino ad un limite che non viene oltrepassato. Ciò dimostra che nell'interno della cella si determina una pressione fino ad un valor massimo, detta *pressione osmotica* della soluzione. Notiamo che lo zucchero *non passa* affatto all'esterno.

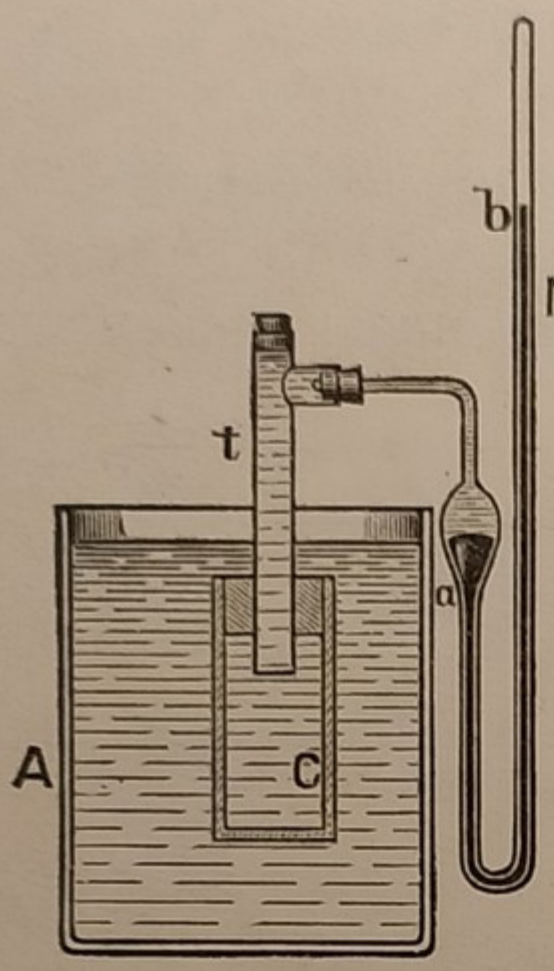

Fig. 214.

La pressione osmotica dipende dalla natura della soluzione, dalla sua concentrazione e dalla temperatura, ed è indipendente dalla natura e dallo spessore della membrana.

La pressione osmotica presenta dei caratteri di alta importanza per lo studio teorico di molti fenomeni fisico-chimici.

Le soluzioni che hanno la stessa pressione osmotica si dicono *isotoniche*.

65. Fenomeni di capillarità. — I fenomeni di adesione fra solidi e liquidi portano a delle eccezioni alle leggi dell'Idrostatica.

Nell'Idrostatica abbiamo visto che un liquido presenta i seguenti caratteri: 1° non ha forma propria; 2° la sua superficie libera è orizzontale; 3° si dispone alla stessa altezza in più vasi comunicanti.

Ma queste leggi sono state da noi formulate nell'ipotesi che le molecole del liquido sieno soggette soltanto alla gravità. Nel caso reale, oltre la gravità, intervengono anche la coesione e l'adesione; perciò si riscontra: 1° che una goccia di mercurio, posata sopra una lastra di vetro pulita, prende una forma che è tanto più vicina alla forma sferica quanto è più piccola; 2° che la superficie d'un liquido non è orizzontale in vicinanza delle pareti; 3° che in un tubo di vetro sottile, *capillare* come si dice, il livello del liquido è diverso dal livello dello stesso liquido in una vaschetta, dove il detto cannello è parzialmente immerso, e la superficie libera nel tubo non è affatto piana.

Queste eccezioni si deducono dagli stessi principî e formano un gruppo di fenomeni detti fenomeni *capillari*.

In un bicchiere comune contenente dell'acqua la superficie libera è per la massima parte piana e orizzontale, ma, se ben si osserva, vicino alle pareti mostra un accentuato innalzamento (fig. 215).

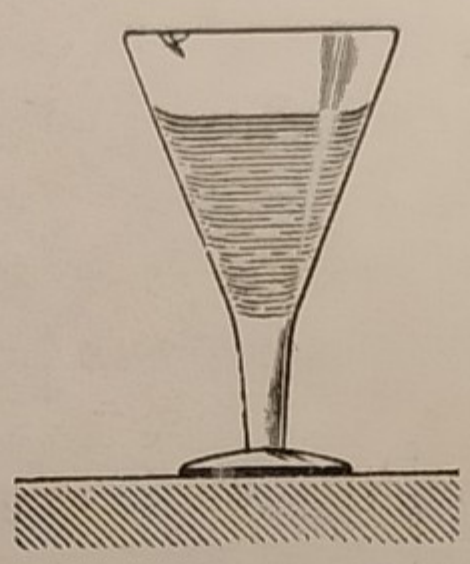

Fig. 215.

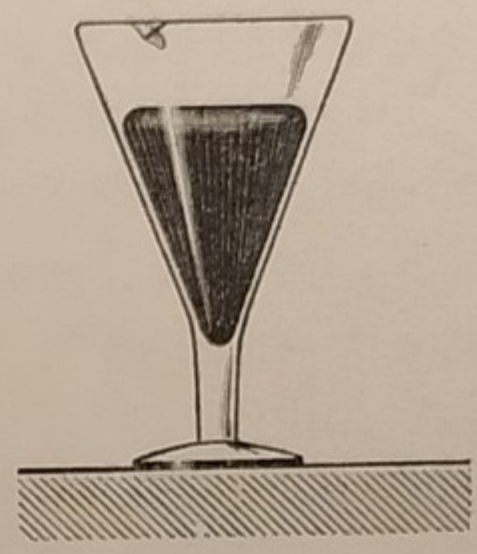

Fig. 216.

Il mercurio invece, posto in un vaso di vetro, presenta ancora nel mezzo una superficie orizzontale, ma vicino alle pareti mostra un abbassamento (figura 216). Così in un tubo di vetro piuttosto stretto, immerso parzialmente in un liquido, si manifesta una superficie libera concava, detta *menisco concavo*, se il liquido *bagna* il tubo, e nell'interno di questo il liquido si trova *sollevato* sopra il livello esterno (fig. 217). Se il liquido *non bagna* il tubo, si ha un *menisco convesso* e il livello interno si trova *più basso* del livello esterno (fig. 218).

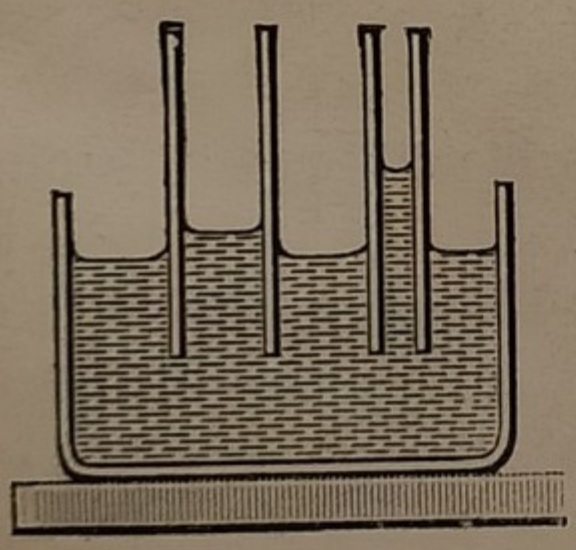

Fig. 217.

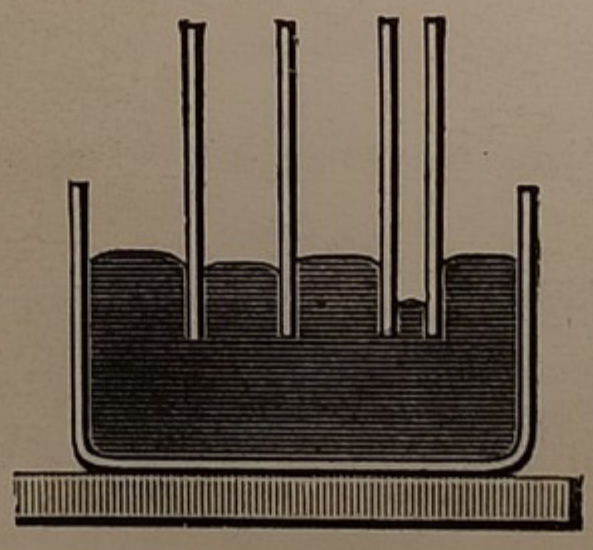

Fig. 218.

La differenza di livello resta inalterata nel vuoto, ciò che esclude l'influenza della pressione atmosferica.

Nell'un caso o nell'altro è verificata la seguente *legge di Jurin*: *la differenza di livello varia in ragione inversa del diametro del tubo*, il diametro essendo misurato all'altezza del menisco.

Quando il liquido bagna il tubo, l'innalzamento *non dipende nè dallo spessore nè dalla natura del tubo*, ma dipende dalla natura del liquido e dalla temperatura. In un tubo di vetro ben pulito di 1 mm. di diametro, a 8° C, l'acqua s'innalza di

30 mm., l'alcool di 12, l'etere di 10. L'innalzamento *diminuisce* quando la temperatura *aumenta*.

Quando il liquido non bagna il tubo, la depressione dipende, oltre che dalla natura del liquido e dalla temperatura, anche dalla natura del tubo.

Vogliamo adesso stabilire un fenomeno che ci dà la ragione di tutti i fenomeni capillari.

Molti fatti mostrano che *lo strato superficiale di ogni liquido si comporta come una membrana elastica e contrattile*, tesa sopra il liquido.

Degli aghi da cucire, posati con precauzione sulla superficie dell'acqua, restano galleggianti (fig. 219). Per la stessa

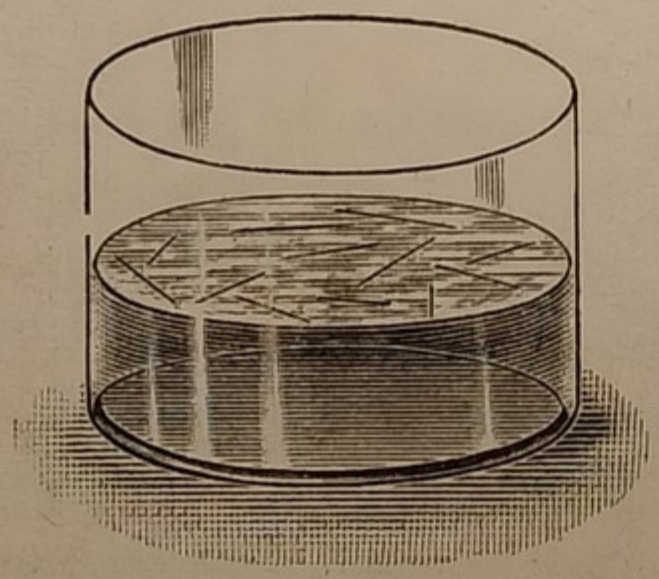

Fig. 219.

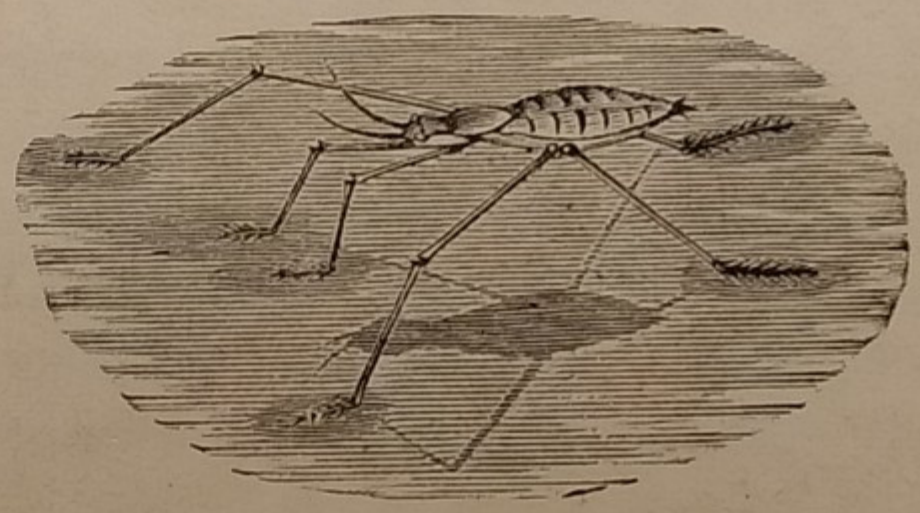

Fig. 220.

ragione un insetto, chiamato idrometra, può passeggiare sulla superficie degli stagni (fig. 220).

Ciò avviene perchè al disotto dell'oggetto galleggiante si forma una depressione, una specie di bacino, sul fondo del quale esso riposa, dovuta tale depressione alla resistenza offerta dalla membranella superficiale del liquido, come mostra la figura 221, nella quale l'ago da cucire galleggiante è rappresentato in sezione trasversale.

Fig. 221.

Con facili esperienze si possono produrre delle vere e proprie lamine liquide assimilabili ad esilissime membrane solide, estendibili ed elastiche, come fossero dei sottilissimi fogli di gomma elastica.

Un anello di filo di ferro, estratto dall'acqua saponata dove era immerso, si trova occupato da una lamina, attaccata tutt'intorno all'anello, piana finchè è lasciata a sè, ma che assume al

forma di una borsa soffiandovi dentro (fig. 222); e che ritorna subito piana cessando di soffiare.

Se si lega a due punti dell'anello (fig. 223) un filo flessibile e poi si distrugge la lamina da una parte del filo, la porzione

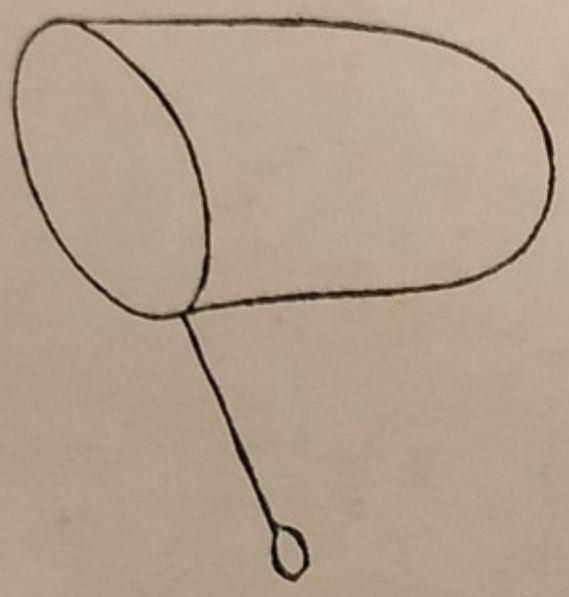

Fig. 222.

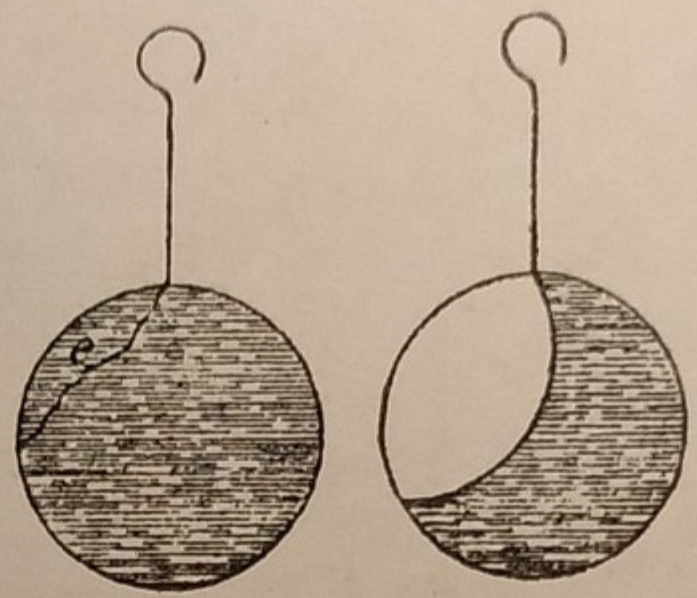

Fig. 223.

rimasta intatta si contrae assumendo, per quanto le permettono i legami a cui aderisce, la minima superficie possibile, e si vedrà il filo assumere la forma di un arco di cerchio; se poi il filo è chiuso su sè stesso, assume la forma di una circonferenza, dopo rotta la lamina che vi era compresa (fig. 224).

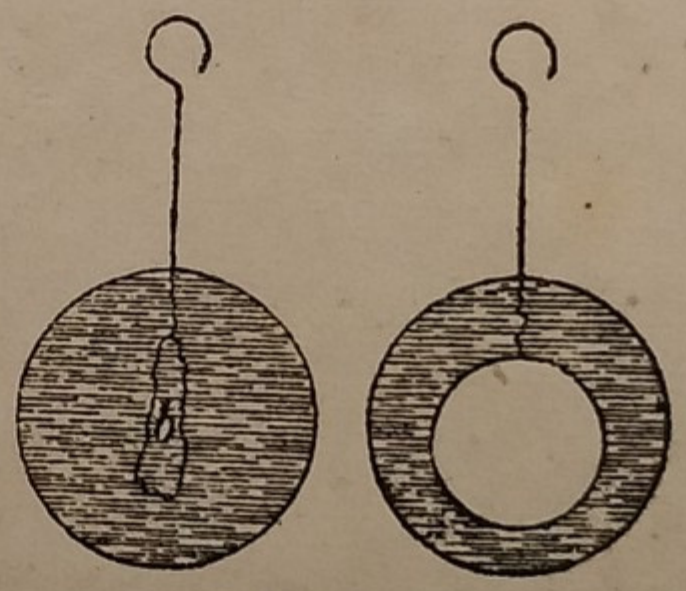

Fig. 224.

Queste esperienze mostrano la tendenza che hanno le lamine liquide a contrarsi, cioè ad occupare la minima superficie compatibile coi legami loro imposti, che nelle prove citate sono rappresentati dall'adesione che obbliga il liquido a rimanere in contatto coi fili.

Sono bellissimi dei sistemi di lamine liquide soggette ad avere un dato contorno, che si può fare con fili di ferro (fig. 225).

Con uno scheletro di filo di ferro in forma di tetraedro si hanno sei lamine triangolari, ciascuna attaccata ad uno spigolo, concorrenti 3 a 3 in 4 rette che hanno un estremo nei vertici, e che concorrono in un punto interno.

Con uno scheletro a forma cubica si ottiene un sistema di 13 lamine, 8 trapezoidali e 4 triangolari, attaccate con un lato

agli spigoli dello scheletro e riunite nell'interno a una piccola lamina avente la forma di un quadrato.

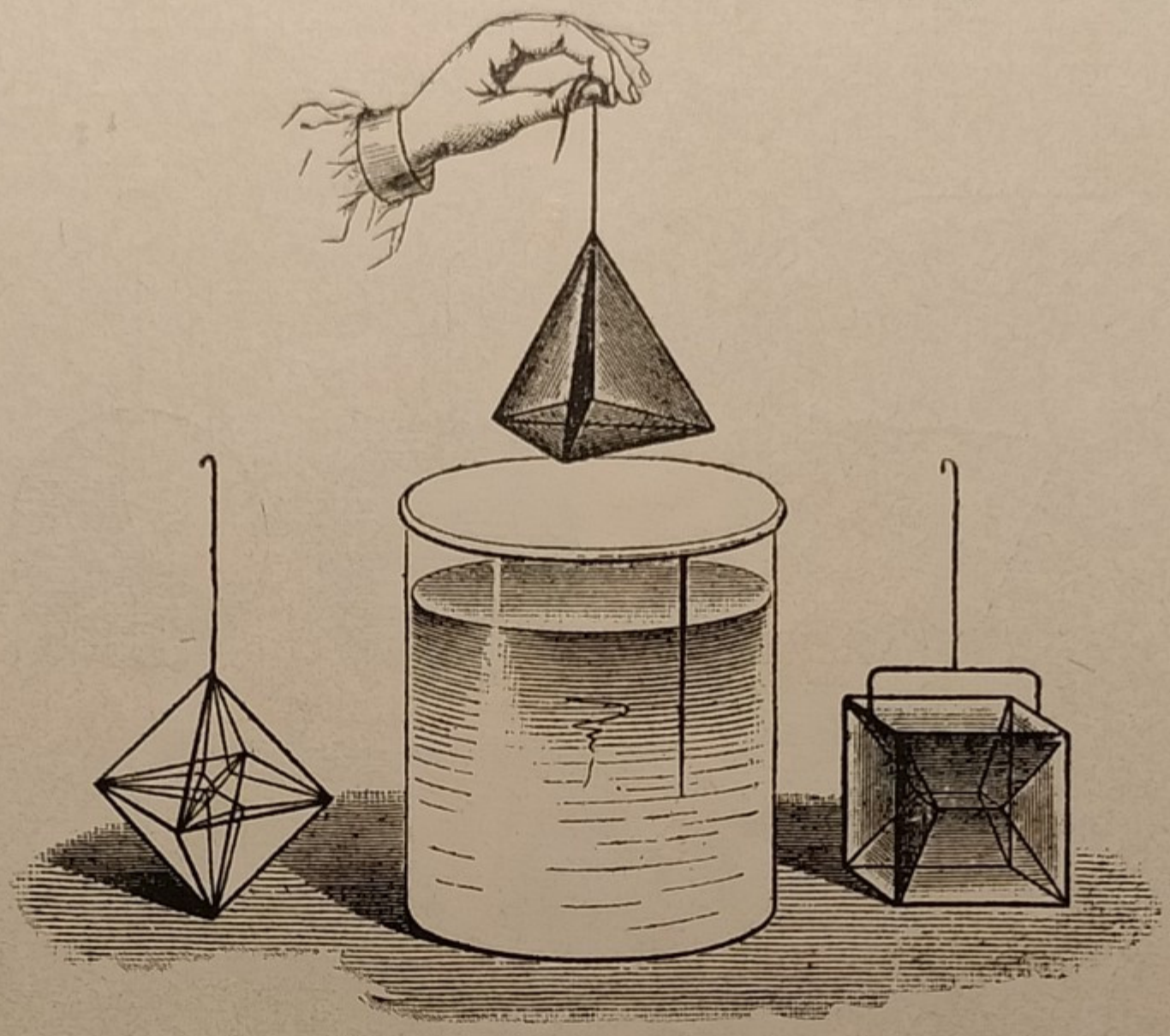

Fig. 225.

Qualunque sia la complicazione dello scheletro, non si hanno mai più di tre lamine concorrenti ad uno spigolo liquido; nè in un punto possono incontrarsi più di quattro spigoli liquidi o più di sei membrane.

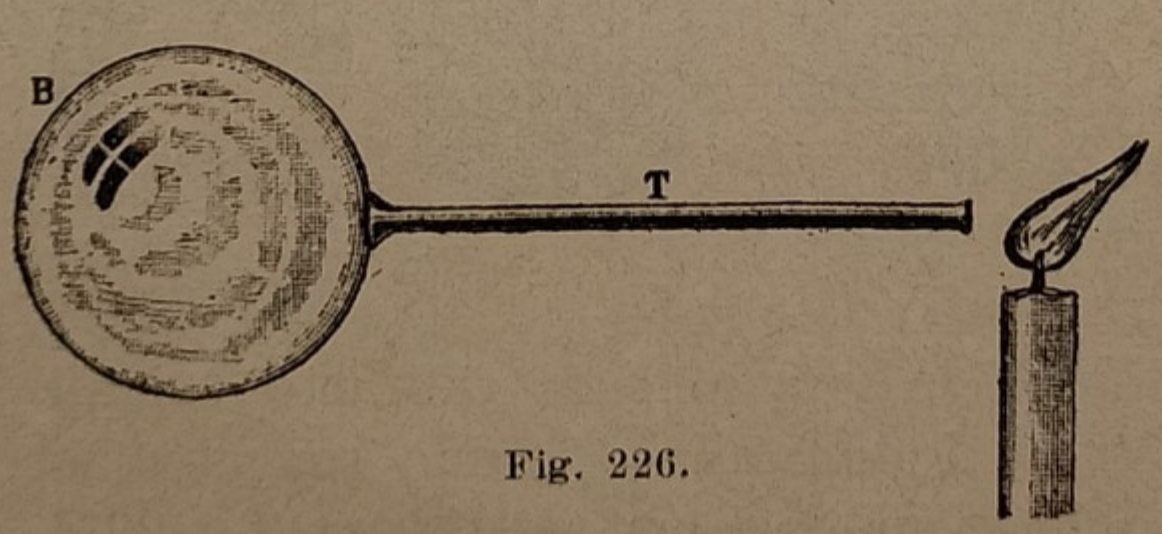

Fig. 226.

Con dell'acqua saponata si soffi una bolla piuttosto grande e si chiuda il tubo. In tal modo la bolla mantiene una grandezza invariabile, e l'inviluppo liquido comprime il gas interno, alla stessa maniera di un pallone di caoutchouc gonfiato d'aria. Se si lascia il tubo aperto la bolla si restringe cacciando l'aria che contiene; infatti la fiamma d'una candela viene piegata dal getto d'aria uscente dal tubo (fig. 226).

Si soffino ora due bolle di diversa grossezza servendosi del tubo di vetro con tre giunti di gomma della figura 227. Chiusa

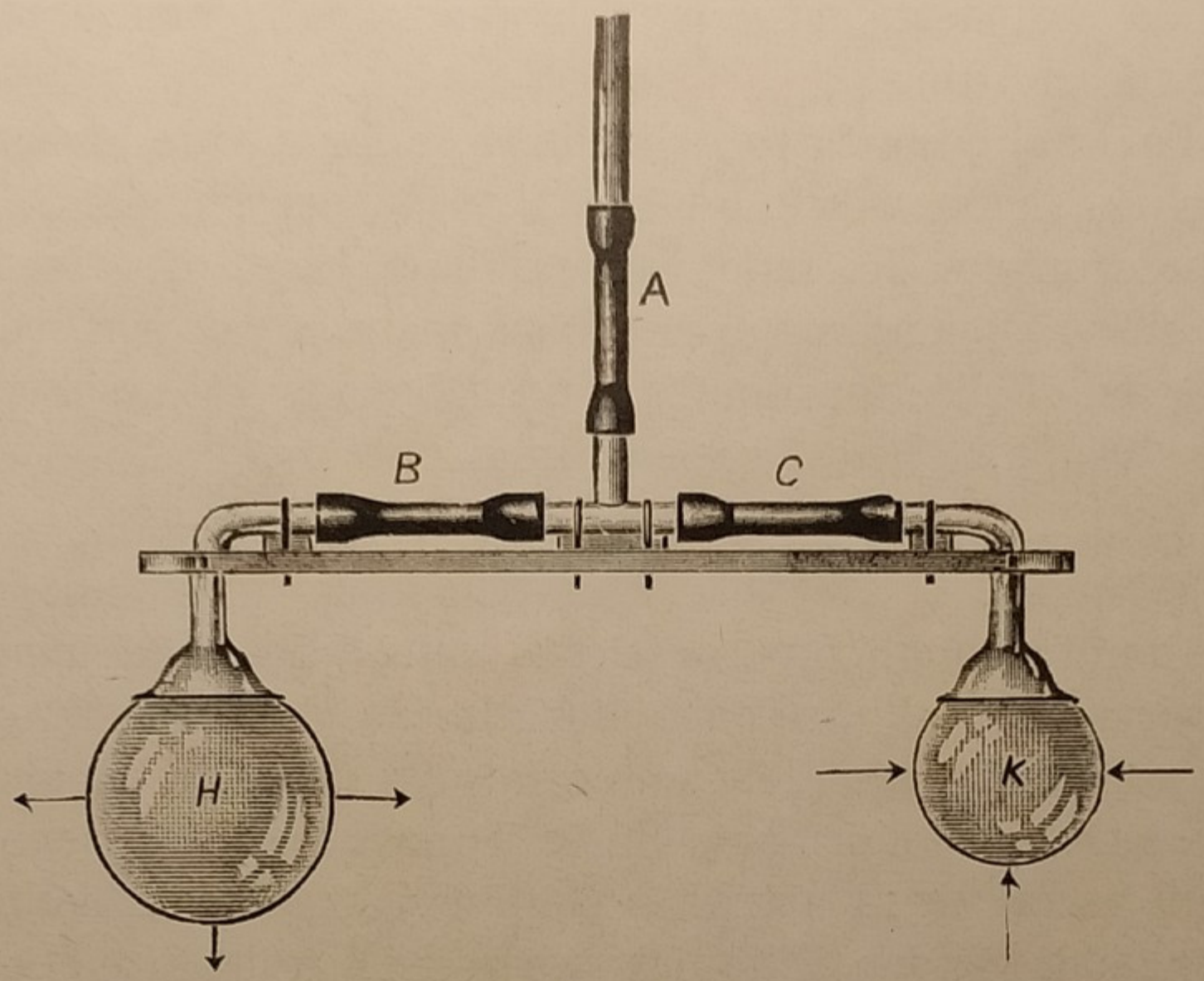

Fig. 227.

la comunicazione verso l'esterno e lasciando comunicare fra loro le due bolle si vedrà dilatarsi la maggiore, mentre la più piccola si sgonfia, mostrando che in questa la pressione è più alta che in quella.

Se la massa liquida non ha contatto e quindi non aderisce a corpi esterni, tende ad assumere la forma sferica, forma nella quale la membrana superficiale occupa la minima superficie possibile. Ciò è verificato nelle goccie.

Questi fatti mostrano dunque che lo stato superficiale di un liquido si comporta come una vera membrana elastica.

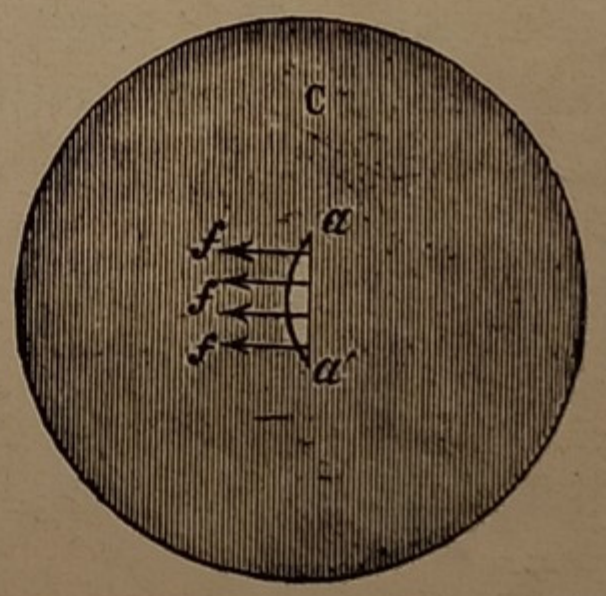

Fig. 228.

Or supponiamo di fare in una sottile membrana di caoutchouc, tesa dentro un anello, un taglio $a\,a'$ lungo 1 cm.; con ciò i due bordi della fenditura si allontanano uno dall'altro (fig. 228). La forza che teneva uniti i due bordi prima di fare il taglio è evidentemente la somma delle forze $f\,f$... che occor-

rerebbe applicare ad uno dei bordi per mantenerlo dritto. La somma di queste forze, per la *lunghezza di un centimetro*, misura la così detta *tensione superficiale* della membrana e la si esprime in dine.

Per l'acqua, a contatto dell'aria, tale forza vale 81 dine; per il mercurio, nelle stesse condizioni, 540; per l'alcool 25,5.

La spiegazione dei fenomeni capillari, legge di Jaurin compresa, si può benissimo avere con un ragionamento in base all'esistenza della tensione superficiale; ma ciò esorbita dai modesti limiti del nostro programma.

66. Viscosità. — Nel § 58 è detto che la velocità di efflusso di un liquido da un foro praticato nella parete del recipiente è proporzionale al quadrato dell'altezza del liquido, altezza che si può anche prendere come misura della pressione che il liquido esercita sull'orifizio. Ma se il movimento avviene in un tubo, in causa degli attriti e degli eventuali cambiamenti di direzione e di sezione, il liquido prova delle resistenze che fanno diminuire la velocità. Se poi il tubo ha assai piccola sezione la velocità diminuisce al punto da divenire anche proporzionale alla semplice pressione.

Il Poiseuille trovò che la portata V (58) per un tubo di lunghezza L e di raggio R, nel quale la differenza di pressione ai capi è H, si può calcolare con la formola:

$$V = k \frac{HR^4}{L} .$$

L'Helmolz poi ha dimostrato che per i liquidi che bagnano il tubo, k si può calcolare con la formola:

$$k = \frac{\pi}{8K}$$

dove K è una costante diversa per ciascun liquido, detta *coefficiente di attrito interno* o anche *coefficiente di viscosità*. La *viscosità* di un liquido è la resistenza che un filetto liquido in moto nel tubo trova movendosi a contatto coi filetti che lo circondano. Perciò avviene che i filetti direttamente a contatto

con le pareti del tubo sono quasi immobili; gli altri hanno velocità che aumentano col diminuire della distanza dall'asse.

La temperatura influisce nel senso che un aumento di essa diminuisce la viscosità. Qui appresso sono notati i coefficienti di viscosità K per alcuni liquidi.

	Temperatura in centigradi	Valori di K
Acqua	0	0,01782
»	10	0,01310
»	20	0,01020
Alcool etilico	10	0,01525
Etere solforico	10	0,00343
Mercurio	17,2	0,01602
Glicerina	2,8	42,20
»	26,5	4,94

TERMOLOGIA

La *Termologia* studia i fenomeni dovuti al calore.

67. Sensazioni termiche ed effetti del calore. — Avvicinandoci ad un caminetto acceso noi abbiamo una sensazione di *caldo*; toccando un pezzo di ghiaccio si ottiene una sensazione di *freddo*. La causa di tali impressioni vien detta *calore*. Un corpo che si riscalda *guadagna calore*, uno che si raffredda ne *perde*.

Le sensazioni termiche sono ricevute da nervi distribuiti in tutto il corpo, e non localizzate in un organo speciale come quelli sensibili al suono e alla luce.

Oltre le sensazioni termiche il calore può produrre i seguenti effetti: 1° cambiamenti nelle dimensioni dei corpi — *dilatazione*; — 2° cambiamenti di stato — *fusione*, *vaporizzazione*; — 3° cambiamenti di natura chimica ed elettrica — *separazione degli elementi di un corpo composto*, *correnti termoelettriche*.

Misura delle temperature.

68. Calore e temperatura. — Il calore è qualche cosa che ha una esistenza obbiettiva e che passando da un corpo ad un altro può produrre, come si è detto, svariati effetti.

La *temperatura* è invece una *qualità* dei corpi caldi; un corpo caldo, in contatto con un corpo freddo, cede ad esso calore; si dice che il primo ha *temperatura più alta* del secondo; e quando il passaggio di calore non ha luogo i due corpi si dicono alla *stessa temperatura.*

Non bisogna però confondere la temperatura con il calore posseduto dal corpo; solo per due corpi di egual peso e di egual natura, la maggiore o minore temperatura corrisponde a una maggiore o minore quantità di calore posseduta.

Un ago che può esser arroventato tenendolo per pochi secondi immerso nella fiamma di una candela, e che ha perciò una piccola quantità di calore, gettato in una pentola d'acqua in ebollizione cede all'acqua del proprio calore, sebbene l'acqua ne possieda una quantità assai maggiore.

Nella stessa maniera, se si mette in comunicazione un sottile e alto tubo di vetro, che può esser riempito con pochissima acqua, con un largo recipiente che contiene molta acqua ma ad altezza minore, il liquido passa dal tubicino al grande recipiente. La temperatura dei corpi si può quindi paragonare all'altezza di un liquido, perciò alcuni l'hanno chiamata *livello termico*, e misura la tendenza del calore a passare da un corpo agli altri con cui viene a contatto.

69. Termometri e scale termometriche. — Il tatto non è giudice esatto nè troppo sensibile per apprezzare la temperatura dei corpi, perciò si è ricorso a degli indicatori fisici, detti *termometri*, i più comuni dei quali si fondano sulla dilatazione prodotta nei corpi dal calore.

Il principio del termometro comune è fondato sulla seguente convenzione di *ritenere eguali due variazioni di temperatura che producono due variazioni eguali nel volume di un medesimo corpo.*

La convenzione ha il suo fondamento nel fatto che gli intervalli di temperatura, riconosciuti eguali con questo criterio, rispetto a un corpo, producono in qualsiasi altro corpo variazioni sensibilmente eguali di volume. Sicchè la misura di una variazione della temperatura si riduce alla misura di una variazione del volume in un corpo che si giudichi adatto allo scopo.

Il termometro comune (fig. 229) è formato di un palloncino o bulbo di vetro, saldato a un cannello sottile, sul quale si valutano le dilatazioni del liquido, che è ordinariamente il mercurio. È preferibile il mercurio: esso è facile a ottenersi puro; il suo punto di congelazione e quello di ebollizione sono abbastanza distanti dalla temperatura ordinaria; è buon conduttore del calore, sì che rapidamente si mette in equilibrio di temperatura col corpo in cui è immerso, e per la sua opacità e brillantezza è nettamente visibile anche in un cannello stretto.

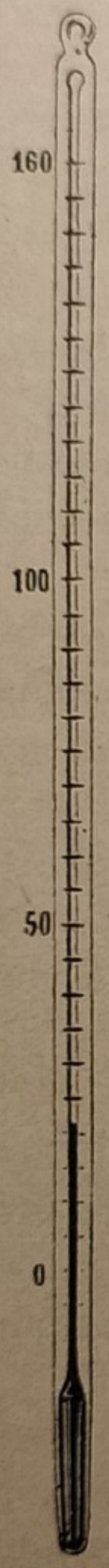

Fig. 229.

Ogni termometro è graduato, ossia porta direttamente sul cannello, o sopra una tavoletta alla quale è unito, delle divisioni numerate dette *gradi*, e si conoscono vari tipi di graduazione, ossia si hanno varie *scale* termometriche. Sono universalmente note tre: 1° *la scala Celsius o centigrada;* 2° *la scala Réaumur;* 3° *la scala Fahrenheit.*

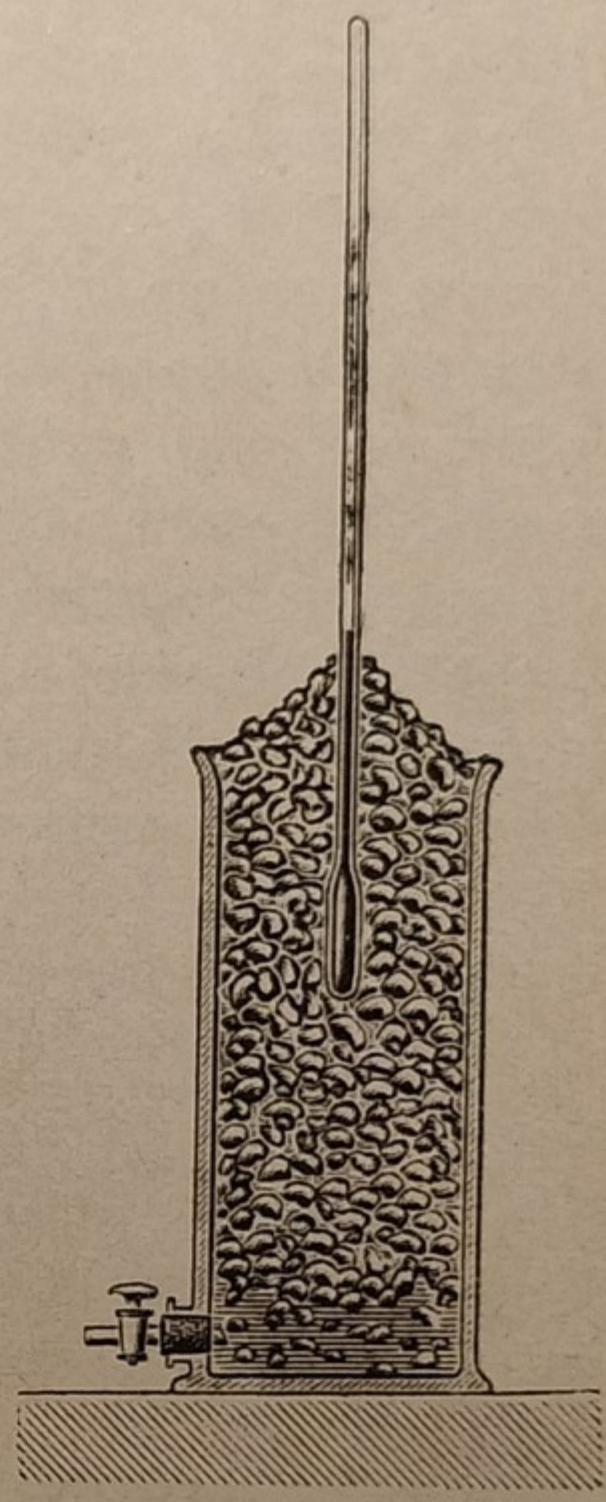
Fig. 230.

In tutti i casi vanno prima segnati sul cannello due punti, detti *punti fissi*, ottenibili facilmente in tutti i luoghi e in tutti i tempi. Ottime per lo scopo sono la temperatura del ghiaccio fondente, e quella del vapore sprigionantesi dall'acqua bollente sotto la pressione normale di un'atmosfera.

Per segnare il primo punto s'immerge il termometro nell'apparecchio della figura 230, contenente ghiaccio pesto in fusione. Per segnare l'altro serve l'apparecchio indicato nella fig. 231, ove il termometro si trova quasi totalmente avvolto da un duplice strato di vapore di acqua bollente, che sta nella

parte inferiore. I vapori salgono per il tubo centrale e scendendo per il tubo maggiore esterno sfuggono nell'atmosfera. Lo strato di vapore esterno ha l'ufficio di sottrarre il termometro all'azione raffreddante dell'atmosfera. Se all'atto dell'esperienza il barometro non segna 76 cm. bisogna fare una correzione, come si dirà più innanzi.

I due punti così ottenuti sul termometro sono contrassegnati per la *scala Celsius* con 0 e 100, e l'intervallo si divide in 100 parti eguali, di cui ciascuna si dice *grado*. La divisione può prolungarsi al di sopra del 100 e al di sotto dello 0.

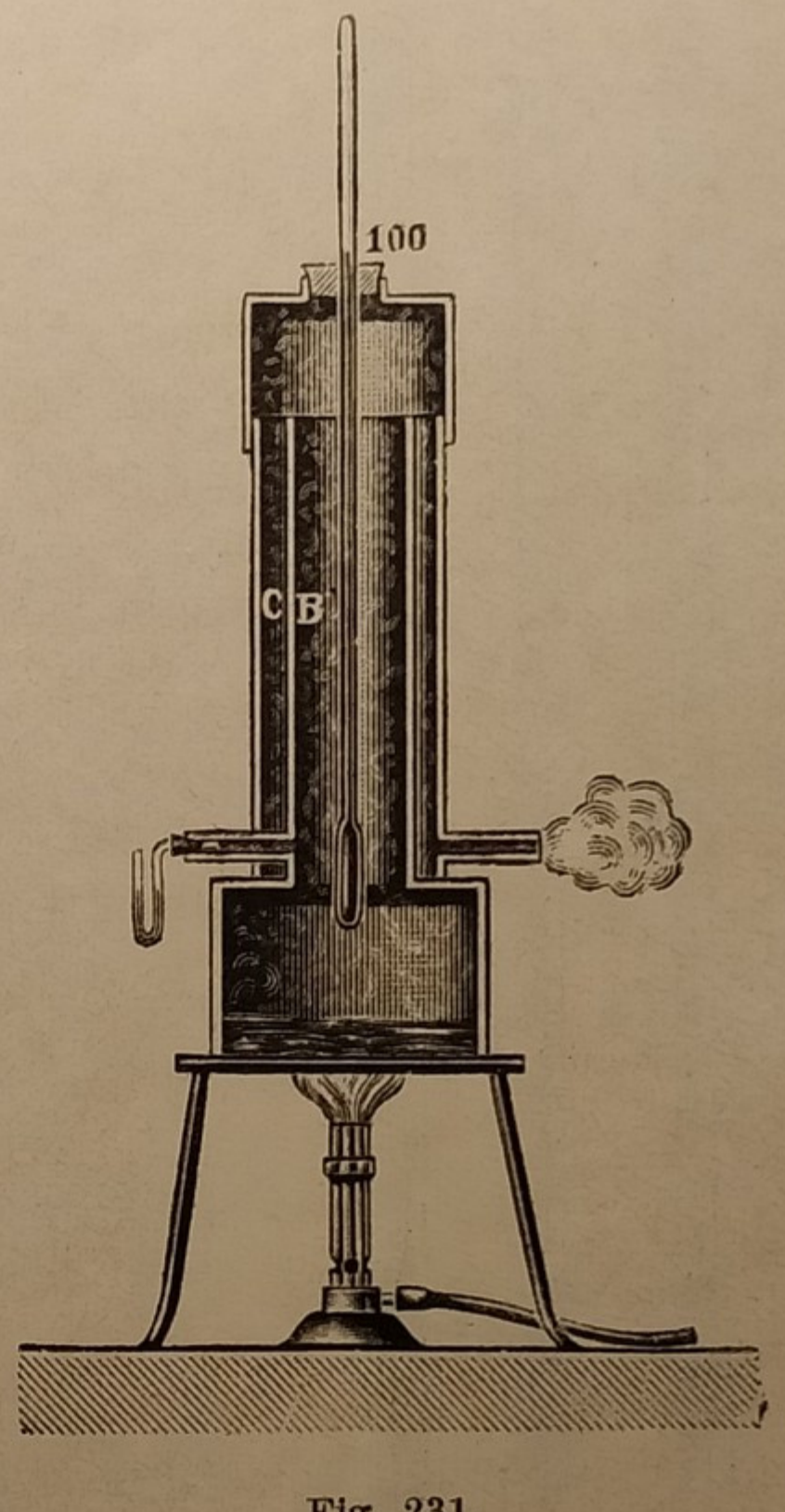

Fig. 231.

In tal modo, se un termometro messo a contatto con un dato corpo segna 30, diremo che la temperatura del corpo è 30°, volendo con ciò significare che il mercurio del termometro nel passare dal ghiaccio fondente alla temperatura del detto corpo subisce un aumento di volume equivalente ai $\frac{30}{100}$ dell'aumento che subisce nel passare dallo 0 al 100.

Nella scala Réaumur ai punti fissi sono segnati i numeri 0 e 80, e l'intervallo è diviso in 80 parti eguali; così il grado Réaumur è più grande del centigrado, cioè i $\frac{5}{4}$ di questo.

Nella scala Fahrenheit i punti stessi hanno i valori 32 e 212 e l'intervallo è diviso in 180 parti eguali.

Queste due ultime scale sono ora poco usate; nelle misure scientifiche si fa esclusivamente uso della scala Celsius; la Fahrenheit è ancora adoperata per gli usi comuni negli Stati

Uniti d'America. Vediamo ora la corrispondenza fra le tre scale.

Sopra tre termometri portanti le tre graduazioni (fig. 232) chiamiamo c la lunghezza di un grado sulla scala Celsius, r quella sulla scala Réaumur, e f sulla Fahrenheit.

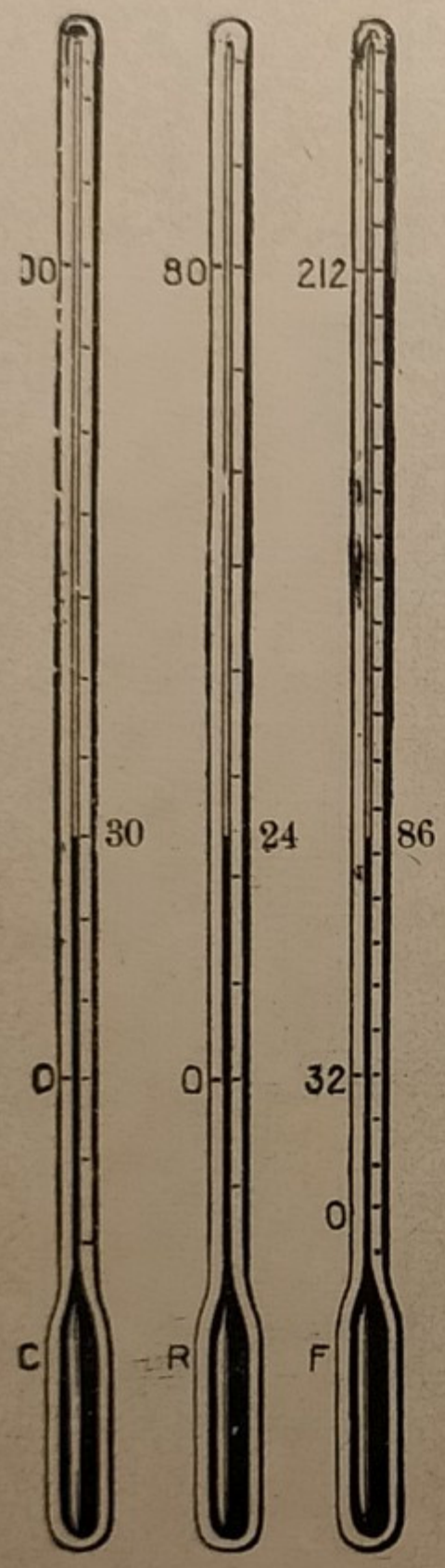

Fig. 232.

L'intervallo compreso *fra i punti fissi* è eguale a:

$$100\,c = 80\,r = (212 - 32)\,f. \qquad (1)$$

Ora indicando con C, R, F i numeri dei gradi che si trovano segnati nelle tre scale a *una stessa temperatura*, la lunghezza compresa fra il punto fisso inferiore e l'estremità superiore del mercurio è ancora la stessa sulle tre scale, cioè:

$$Cc = Rr = (F - 32)\,f. \qquad (2)$$

Dividendo queste tre espressioni rispettivamente per le tre precedenti, si ottiene:

$$\frac{C}{100} = \frac{R}{80} = \frac{F - 32}{180}$$

o ancora:

$$\frac{C}{5} = \frac{R}{4} = \frac{F - 32}{9}. \qquad (3)$$

Queste equazioni sono impiegate per le conversioni; così se è $C = 30$, si ha $R = 24$ ed $F = 86$.

70. Requisiti di un buon termometro. — Un termometro deve essere *pronto*, vale a dire deve acquistare rapidamente la temperatura del corpo con cui è messo a contatto, raggiungendo in breve tempo la indicazione finale. Perciò occorre che il bulbo contenga poco mercurio, e che sia grande la sua superficie a contatto del corpo in proporzione al volume. Quest'ultima condizione si ottiene evitando la forma sferica del bulbo;

in pratica si dà ad esso la forma cilindrica allungata e talora cilindrica schiacciata.

Ma oltre a ciò occorre che il termometro sia anche *sensibile*, cioè deve permettere di misurare variazioni molto piccole di temperatura; per questo occorre che il bulbo sia capace e il cannello sottile.

Come si vede, i due requisiti prontezza e sensibilità malamente si conciliano, talchè, a seconda dell'uso specifico a cui è destinato il termometro, il costruttore esalta l'uno o l'altro dei due.

71. Termometri ad alcool, a toluene, ecc. — Il termometro ordinario a mercurio può servire tra $-39°$ — punto di solidificazione del mercurio — e $357°$ — punto di ebollizione.

L'alcool può servire per temperature fino a $-90°$, perchè questo liquido congela a $-130°$, ma prima di assumere questo stato diventa vischioso. Poichè d'altra parte l'alcool bolle a $78°$, un termometro con tal liquido non può servire per temperature superiori a quest'ultima.

Temperature più basse di quelle che si possono valutare con l'alcool, si possono misurare usando il *toluene* e talora anche l'*etere di petrolio*, col quale si può scendere a $-190°$.

72. Termometri a massima e a minima. — Spesso occorre rilevare il valor massimo o minimo che la temperatura raggiunge in un certo periodo di tempo. Si hanno così i termometri a *massima* e a *minima*, i quali mantengono l'indicazione della massima o della minima temperatura raggiunta.

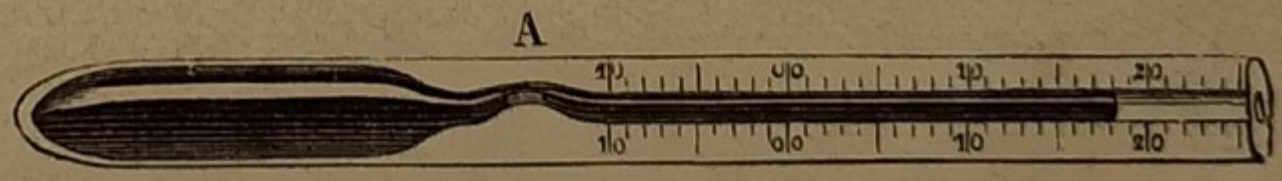

Fig. 233.

La disposizione più frequente usata nel *termometro a massima* è rappresentata nella fig. 233. Il termometro, a mercurio, è disposto orizzontalmente e si differenzia dal tipo ordinario soltanto perchè il cannello, vicino al bulbo, offre una strozzatura, accompagnata talvolta da un incurvamento. In tal modo,

finchè la temperatura aumenta, il mercurio, dilatandosi, vince la resistenza offerta al suo passaggio dalla strozzatura e procede regolarmente nel cannello. Ma allorchè, raggiunta la massima, la temperatura discende, la resistenza della strozzatura impedisce al mercurio di retrocedere e avviene un distacco tra il mercurio del bulbo e quello del cannello; il mercurio rimanente nel cannello segna quindi la temperatura massima raggiunta. Imprimendo delle scosse al termometro, nel senso che va dal cannello al bulbo, si costringe la colonna di mercurio a ricongiungersi con quello del bulbo.

Il *termometro clinico* è formato sul tipo del precedente, ma ha soltanto la graduazione compresa tra 30° e 45°, essendo superflue le altre divisioni.

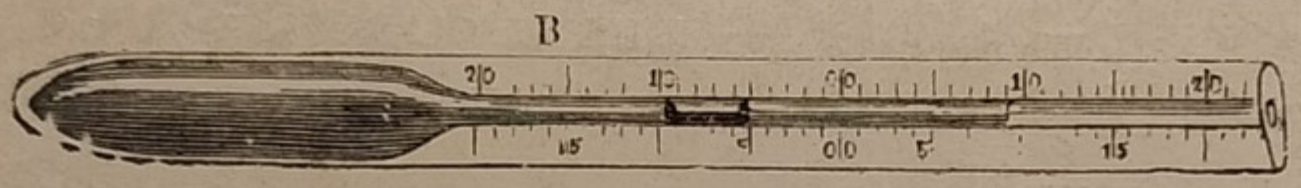

Fig. 234.

Il *termometro a minima* (figura 234) è un termometro ad alcool posto orizzontale. Entro il tubo, immerso nell'alcool, trovasi un *indice*, cioè un cilindretto di vetro colorato di diametro un po' minore del diametro interno del tubo, sì che l'alcool, per aumento di temperatura, procede nel cannello passando tra l'indice e le pareti del tubo. Intanto l'indice resta fermo, poichè il debole movimento dell'alcool non riesce a spingerlo innanzi con forza sufficiente a vincere l'attrito ch'esso trova contro le pareti del cannello. Se però la temperatura decresce, non appena il menisco dell'alcool viene a contatto con l'estremità dell'indice più lontana dal bulbo, l'indice, per adesione col menisco, che offre la resistenza di una vera e propria membrana (65), torna indietro per tutto il tempo che la temperatura discende, talchè la minima è segnata dalla posizione dell'estremo dell'indice più lontano dal bulbo. Per la messa a posto dell'apparecchio basta inclinarlo col bulbo in alto, in modo che per effetto del proprio peso, l'indice, scivolando lungo il cannello, vada ad appoggiarsi sul menisco dell'alcool.

Un apparecchio che può ad un tempo servire per la massima e per la minima è il *termometro di Bellani*.

Esso (fig. 235) porta un bulbo *S* pieno di alcool, unito ad un cannello capillare che termina dalla parte opposta con una bolla. Nel gomito del tubo capillare fra *M* e *N* si trova del mercurio, mentre dell'alcool si trova anche sopra il mercurio in *N*, e tale alcool riempie una parte della bolla. Quando la temperatura aumenta l'alcool del serbatoio *S* si dilata, il livello del mercurio in *M* si abbassa e s'innalza in *N*; il contrario succede quando la temperatura diminuisce. La colonnina di mercurio spostandosi in tal modo, spinge dinanzi a sè coll'estremità, due leggeri indici di vetro. Questi si arrestano nel tubo termometrico al punto dove la colonnina di mercurio li porta, in grazia di una spiralina di vetro che li avvolge e che sfrega leggermente contro le pareti del tubo. In tal maniera l'estremo inferiore dell'indice di sinistra segna la minima, l'estremo inferiore di quello di destra la massima.

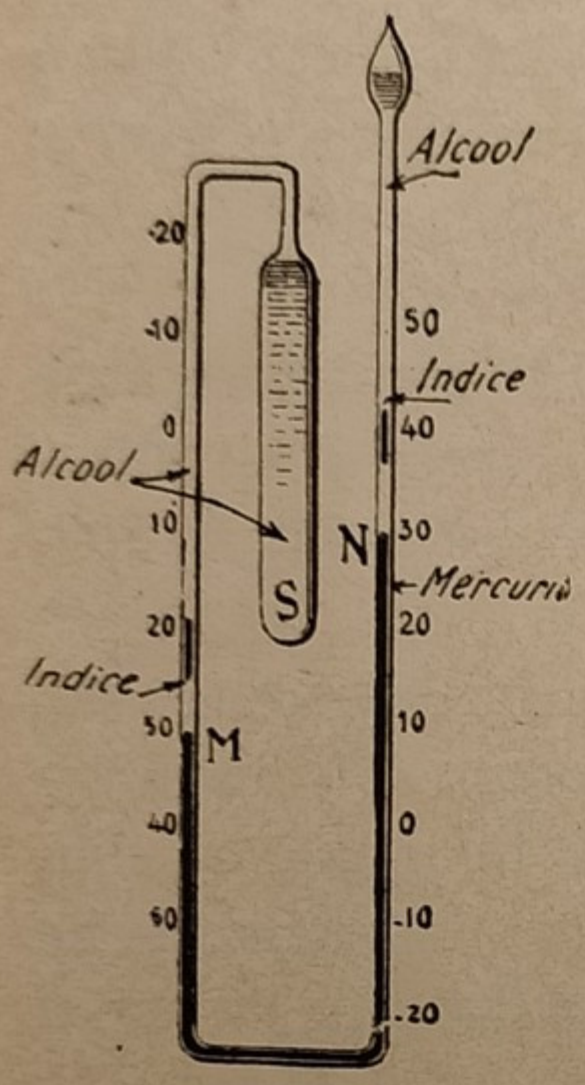

Fig. 235.

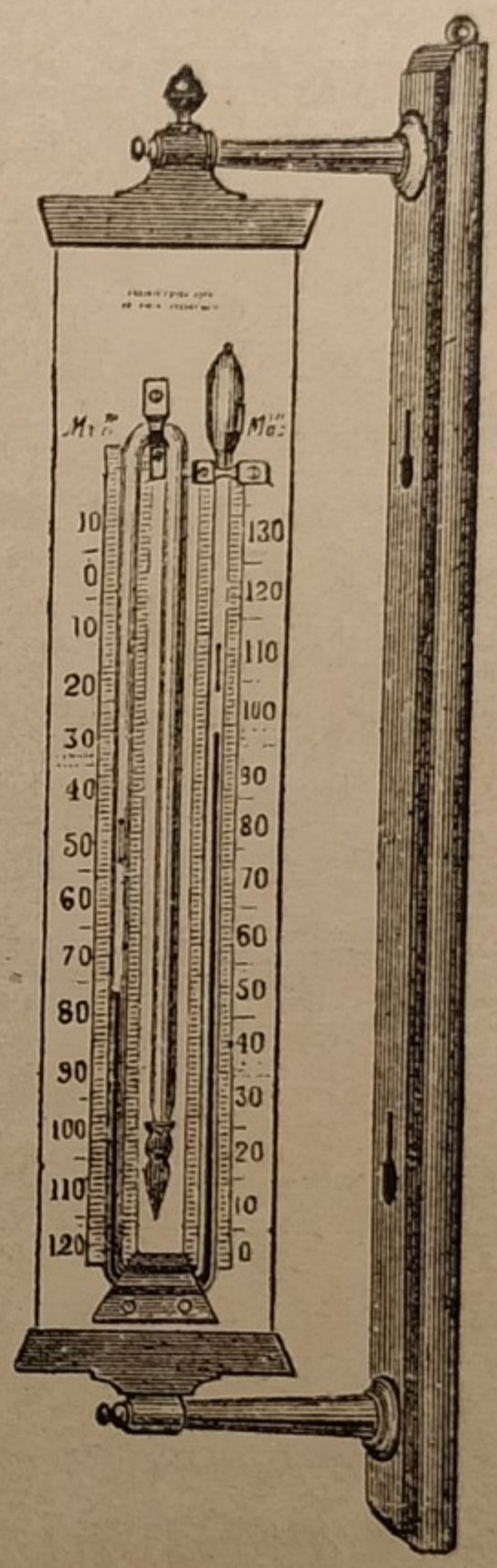

Fig. 236.

Fatta una lettura, per rimettere l'apparecchio in condizione da servire per una successiva determinazione, si fanno discendere i due indici fino a venire a contatto col mercurio, operazione che si eseguisce facendo scorrere una piccola calamita lungo il cannello; gli indici chiudendo nell'interno un pezzetto di filo di ferro, seguono il moto della calamita.

La figura 236 mostra il termometro nel suo insieme.

Dilatazione.

73. Dilatazione termica dei solidi - Dilatazione lineare. — Le dimensioni di un corpo variano colla temperatura; in particolar modo, individuati due punti qualunque in un corpo solido, la distanza di questi varia colla temperatura. Ciò si esprime dicendo che in generale un corpo subisce per effetto di un cambiamento di temperatura una *dilatazione lineare*.

Lo studio della dilatazione lineare nei solidi si può eseguire riducendo il corpo alla forma di sbarra, e misurando la variazione di lunghezza che questa subisce al variare della temperatura.

Portiamo anzitutto tale sbarra a 0^o, immergendola nel ghiaccio fondente, e misuriamone la lunghezza, che indicheremo con l_o. In seguito portiamo la sbarra in un bagno ad una temperatura nota t^o, e misuriamo la nuova lunghezza, che chiameremo l_t. L'allungamento totale della sbarra per la variazione di t^o, è perciò:

$$l_t - l_o;$$

l'allungamento medio per 1^o di tutta la sbarra è:

$$\frac{l_t - l_o}{t}$$

e l'allungamento medio per 1^o, *dell'unità di lunghezza a* 0^o della sbarra è:

$$\frac{l_t - l_o}{l_o t}\ .$$

Questo numero lo chiameremo *coefficiente di dilatazione lineare medio fra* 0^o *e* t^o della sostanza di cui è fatta la sbarra; lo indicheremo con k. Sarà dunque per definizione:

$$k = \frac{l_t - l_o}{l_o t}\ . \qquad (1)$$

Tale formola, risolta rispetto a l_t, diventa:

$$l_t = l_o\,(1 + kt)\,. \qquad (2)$$

L'espressione $1 + kt$ dicesi *binomio di dilatazione lineare.*

Queste formole servono a risolvere tutti i problemi della dilatazione lineare.

Esempio. — Il coefficiente lineare medio fra 0° e 100° del rame è 18×10^{-6}; una sbarra di rame che a 0° è lunga $25^{cm.}$ quanto diventa lunga a 60°?

Abbiamo, applicando la (2):

$$l_{60} = 25\ (1 + 18 \times 10^{-6} \times 60).$$

Eseguite le operazioni si trova:

$$l_{60} = 25^{cm},027.$$

È necessario avvertire che il numero k, definito dalla formola (1), è il coefficiente di dilatazione lineare *medio fra 0° e t°*. Ora l'esperienza dimostra che dando all'intervallo $(0°, t°)$ valori diversi, il coefficiente acquista pure valori qualche po' diversi. In generale aumentando tale intervallo di temperatura il coefficiente cresce, sebbene in misura praticamente trascurabile. Qui sotto sono segnati i valori del coefficiente di dilatazione lineare medio fra 0° e 100° di alcuni corpi:

Vetro	da	0,0000056 a 0,0000077
Platino	»	0,000009
Ferro	»	0,0000122
Rame	»	0,000017
Zinco	»	0,000029.

Finiamo questi cenni sulla dilatazione lineare ricordando che esiste una lega, una specie di acciaio al nichel — 64 di Fe, 36 di Ni — che ha un coefficiente di dilatazione quasi nullo; avuto riguardo a tale carattere, la lega vien detta *invar*.

74. Dilatazione cubica. — Seguendo un ragionamento analogo al precedente, possiamo definire il *coefficiente di dilatazione cubica* di un corpo qualunque solido, liquido o gassoso.

A tale scopo indicheremo con V_o e V_t i volumi assunti dal corpo in questione alle temperature $0°$ e $t°$ e chiameremo

coefficiente medio tra 0° e t° di dilatazione cubica il numero a definito dalla formola:

$$\alpha = \frac{V_t - V_o}{V_o t} \qquad (1)$$

dalla quale si ottiene:

$$V_t = V_o (1 + \alpha t). \qquad (2)$$

In questo caso $1 + at$ dicesi *binomio di dilatazione cubica.*

Per i corpi *isotropi*, cioè quelli che si dilatano egualmente in tutte le direzioni e che per conseguenza alle diverse temperature conservano la stessa forma geometrica, pur cambiando di volume, si può dimostrare che il coefficiente di dilatazione cubica è approssimativamente *triplo* del coefficiente di dilatazione lineare. Cosicchè i numeri della tabellina del paragrafo precedente moltiplicati per tre diventano i coefficienti di dilatazione cubica dei corpi ivi indicati.

75. Variazione della densità con la temperatura. — La densità di un corpo è il rapporto tra la massa e il volume (44), quindi la massa è il prodotto della densità per il volume. Indicando con D_o, V_o, e D_t, V_t le densità e i volumi di uno stesso corpo a 0° e a $t°$, poichè la massa del corpo non varia colla temperatura, possiamo scrivere:

$$D_o V_o = D_t V_t . \qquad (1)$$

Cioè mentre il volume cresce colla temperatura la densità diminuisce.

Sostituendo a V_t il suo valore dato dalla (2) del § precedente, abbiamo:

$$D_o V_o = D_t V_o (1 + \alpha t);$$

per conseguenza:

$$D_t = \frac{D_o}{1 + \alpha t} . \qquad (2)$$

76. Dilatazione dei liquidi. — Un liquido essendo contenuto in un vaso, la capacità di questo aumenta col riscaldamento, ciò che maschera in parte la dilatazione del liquido.

Dulonge Petit hanno misurato la dilatazione *vera* o *assoluta* del mercurio con un *metodo indipendente dalla dilatazione del recipiente.*

Per comprendere il principio del metodo, prendiamo due cannelli di vetro *MN* e *OP*, lunghi oltre un metro, disposti verticali e posti inferiormente in comunicazione mediante un pezzo di tubo di gomma (fig. 237). Riempiamo i tubi di acqua un po' colorata e scaldiamo uno dei tubi facendovi scorrere su e giù una fiamma a gas. Appoggiando una squadretta ad uno dei tubi, vediamo che il liquido, che in principio era allo stesso livello si va innalzando nel tubo *OP*. Fra l'acqua calda e l'acqua fredda si manifesta una differenza di livello per il fatto poco sopra studiato, che l'acqua riscaldata assume una densità media inferiore a quella fredda e quindi si verifica il fenomeno dei vasi comunicanti con liquidi di diversa densità (40).

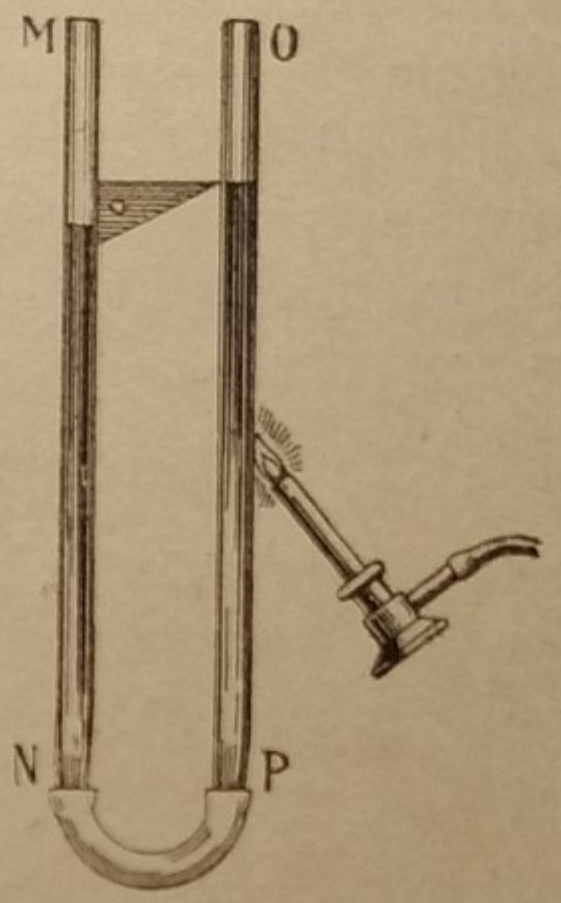

Fig. 237.

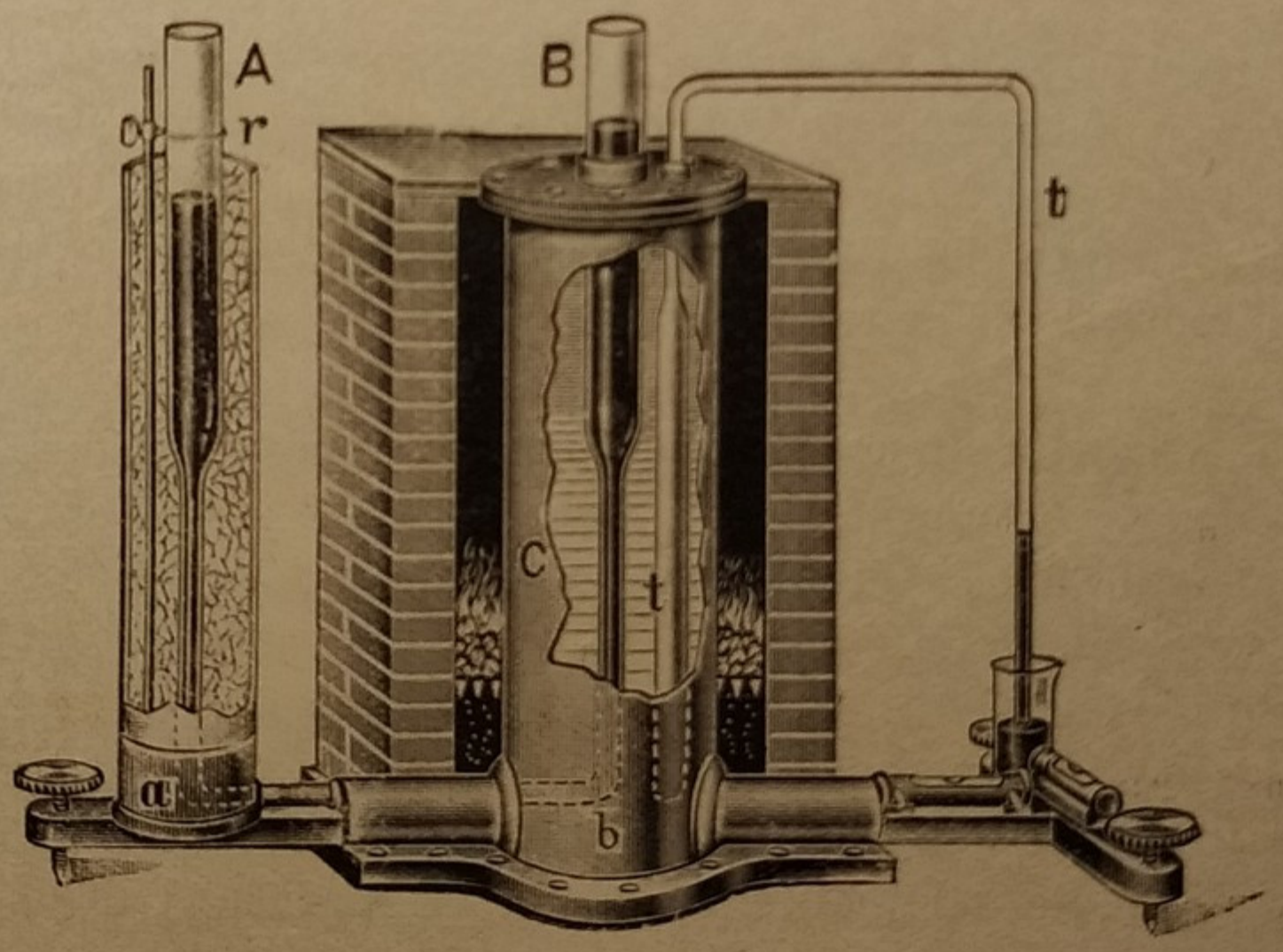

Fig. 238.

L'apparecchio Dulong e Petit è formato di due tubi di vetro *A* e *B* (fig. 238) piuttosto larghi nella parte superiore; *A* è circondato da un manicotto contenente ghiaccio pesto,

B è posto dentro un cilindro di rame C, pieno d'olio che si riscalda. La temperatura è indicata da un termometro t immerso nell'olio. Il tubo ab di comunicazione è disposto orizzontale col mezzo di viti di livello.

Riscaldato l'olio ad una conveniente temperatura t^o, si misurano le altezze H_t e H_o del mercurio, contate dall'asse del tubo orizzontale ab. Per l'equilibrio del mercurio deve essere (40):

$$H_t D_t = H_o D_o,$$

nella quale D_t e D_o rappresentano la densità del mercurio a t^o e a 0^o. E sostituendo a D_t il suo valore dato dalla (2) del paragrafo precedente, si ottiene:

$$\frac{H_t D_o}{1 + \alpha t} = H_o D_o \ ;$$

e da questa:

$$\alpha = \frac{H_t - H_o}{H_o t} \ .$$

Si trovò in tal modo che la dilatazione del mercurio tra 0° e 100° è sensibilmente proporzionale all'aumento di temperatura e il coefficiente α risultò eguale a 0,0001825.

Al di sopra dei 100°, il coefficiente del mercurio cresce più rapidamente della temperatura.

77. Capacità di un vaso a diverse temperature. — La densità d_o del mercurio a 0° è nota con tutta esattezza; essa è eguale a 13,5955. Quindi, servendoci della formola (2) del § 75, potremo calcolare le densità d_{10}, d_{20}... del mercurio a 10°, 20°... Preso il recipiente da studiare, si determinano le masse M_o, M_{10}, M_{20}... di mercurio che può contenere a 0°, 10°, 20°...; divise le masse per le rispettive densità, si hanno i volumi V_o, V_{10}, V_{20}... del recipiente alle stesse temperature.

78. Dilatazione dei liquidi diversi dal mercurio. — Col metodo ora esposto, supponiamo che si sieno determinate le capacità di un picnometro a 0° e a 30°. Messoci il liquido che si vuole sottoporre alla prova, ad esempio l'alcool, si determi-

nino le masse M_0 e M_{30} di alcool che il picnometro contiene fino al punto di affioramento; queste masse le divideremo per le capacità V_0 e V_{30} del picnometro, ed avremo le densità d_0 e d_{30} dell'alcool a 0° e a 30°.

Da queste densità, usando la formola (2) del § 74, potremo facilmente avere il coefficiente di dilatazione cubica dell'alcool.

Dalle misure fatte si riscontra che i coefficienti di dilatazione dei liquidi, eccettuati il mercurio, l'acqua e i liquidi sopra-riscaldati, sono dell'ordine di grandezza del millesimo; ecco alcuni numeri:

Acetone	0,00162	Essenza di trementina	0,00100
Alcool	0,00105	Glicerina	0,00053
Benzolo	0,00138	Olio d'oliva	0,00074
Cloroformio	0,00140	Toluene	0,00121

79. Dilatazione dell'acqua. — L'acqua ha un'importanza considerevole in natura; perciò la conoscenza delle sue proprietà è particolarmente interessante.

Nei laboratori spesso usando l'acqua si determina la capacità di un recipiente; occorre dunque conoscerne la densità.

Nella determinazione delle densità dei corpi, sia usando il metodo della boccetta, sia quello della bilancia idrostatica, è necessario conoscere la densità dell'acqua e in modo particolare la sua densità a 0°.

Ma prima di tutto vogliamo constatare che la dilatazione dell'acqua è *irregolare*. In generale il volume di un liquido diminuisce in modo continuo quando lo si raffredda. L'acqua non segue sempre questa regola. Al di sotto di 4° essa si dilata invece di contrarsi; *a 4° il volume di una data massa d'acqua è minimo e la densità è massima.*

La dilatazione del recipiente maschera in parte il fenomeno e non permette che di determinare un minimo di volume *apparente*. Infatti, se si hanno due termometri uno a mercurio e l'altro ad acqua e si raffreddano simultaneamente a partire da 15°, si riscontra che i due liquidi scendono dapprincipio d'accordo. Quando il termometro a mercurio è vicino ai 6°, il livello dell'acqua apparisce stazionario, e se si continua il raffreddamento, l'acqua *sale*, mentre il mercurio continua a

scendere: in tal modo il *massimo apparente di densità dell'acqua in un recipiente di vetro si verifica verso i 6°.*

Il *massimo vero di densità* è a 4° e lo si può provare coll'esperienza dovuta ad Hope, fisico scozzese. Una provetta (fig. 239), contenente acqua, è circondata a metà da una vaschetta metallica contenente un miscuglio frigorifero e le pareti della provetta sono attraversate da due termometri a mercurio. Supponiamo che la temperatura iniziale dell'acqua sia 15°; si vedrà che, appena messo il miscuglio frigorifero, il termometro inferiore scende gradualmente fino a 4°, mentre quello superiore non si muove. Non appena però quello inferiore ha toccato i 4°, il termometro superiore comincia a discendere e si abbassa fino a raggiungere 0°; si vedrà anzi formarsi del ghiaccio nell'acqua degli strati superiori, ma il termometro inferiore resta fermo a 4°.

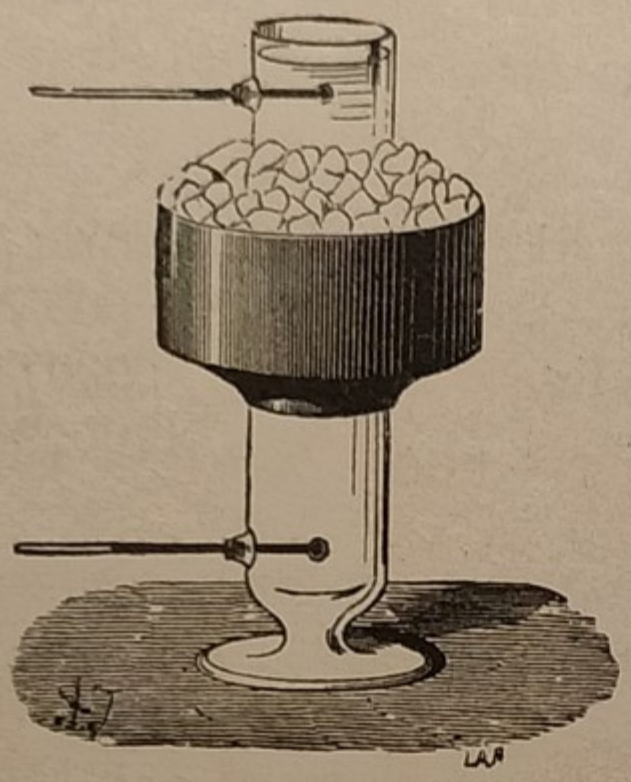

Fig. 239.

In questa esperienza avviene prima un movimento discendente dell'acqua della regione mediana, che raffreddata dal miscuglio diventa specificamente più pesante; tale movimento cessa quando l'acqua dalla metà in giù è divenuta massimamente pesante, cioè fino a che tale acqua ha raggiunto i 4°. Da questo punto si formano delle correnti ascendenti, dovute al fatto che l'acqua a temperatura diversa da 4° ha minore densità, e tali correnti ascendenti continuano anche finchè l'acqua nella metà superiore della provetta abbia assunto la temperatura di 0°.

La dilatazione anomala dell'acqua spiega facilmente perchè il ghiaccio cominci a formarsi alla superficie delle masse d'acqua esposte ai freddi invernali.

80. Dilatazione dei gas. — I gas sono eminentemente dilatabili, com'è stato provato con elementari esperienze (4).

Ma mentre che nei solidi e nei liquidi le variazioni di volume dipendono in maniera quasi esclusiva dai cambiamenti

di temperatura, nel caso dei gas il volume posseduto da una data massa della sostanza, è dipendente non solo dalla temperatura, ma anche dalla pressione. Per conseguenza, nello studiare gli effetti del calore, noi dovremo precisare bene la pressione alla quale il gas si trova sottoposto prima e dopo il riscaldamento.

Lo studio della dilatazione può essere fatto in due condizioni particolarmente semplici: si può cioè mantenere invariata la pressione a cui il gas è sottoposto, e misurare gli aumenti di volume provocati da noti aumenti di temperatura; in tal caso si studia *il gas a pressione costante.*

Oppure si può, mentre si fa variare la temperatura, costringere il gas a conservare invariato il volume primitivo, regolando convenientemente la pressione, e misurare la nuova pressione; in quest'ultimo caso si studia *il gas a volume costante.*

Nella prima maniera i gas vennero studiati dal nostro Volta e meglio dal Gay-Lussac; costui trovò anzi la legge che porta il suo nome e che dice:

Tutti i gas si dilatano egualmente, con un coefficiente di dilatazione eguale a $\frac{1}{273}$ *, e tale coefficiente è indipendente dalla pressione e dai limiti di temperatura entro i quali si opera.*

Talchè, indicando con α tale coefficiente, ai gas riscaldati a pressione costante si adatta la formola nota:

$$V_t = V_o\,(1 + \alpha t) \qquad (1)$$

dove α dunque è eguale a $\frac{1}{273} = 0{,}003655$.

Il riscaldamento dei gas a *volume costante* fu con molta cura studiato dal Régnault, che rifece anche gli studi di Gay-Lussac.

Il Régnault trovò che in tali circostanze la pressione assunta dal gas varia colla temperatura seguendo la stessa legge dei volumi; sicchè, detta H_o la pressione a 0^o e H_t quella a t^o, si ha la formola:

$$H_t = H_o\,(1 + \beta t); \qquad (2)$$

dove β è il così detto *coefficiente di tensione.*

Si potrebbe facilmente dimostrare che, se il gas seguisse la legge di Boyle, dovrebbe essere:

$$\alpha = \beta .$$

In realtà però α non è rigorosamente eguale per tutti i gas, e non è nemmeno costante per lo stesso gas, cimentato a diverse temperature e pressioni, e nemmeno è $\alpha = \beta$ in via rigorosa, in causa delle inevitabili deviazioni dei gas dalla legge di Boyle.

Tuttavia le differenze sono praticamente trascurabili per i gas che, come l'idrogeno, l'ossigeno, l'azoto, e quindi l'aria, sono difficili a liquefarsi; quando però tali gas vengono cimentati a temperature non molto diverse da zero ed a pressioni non molto diverse da un'atmosfera.

Un gas che seguisse rigorosamente le leggi esposte si chiamerebbe *gas perfetto*.

81. Equazione caratteristica dei gas. — Proponiamoci di trovare una relazione fra il volume, la temperatura e la pressione di una data massa di gas perfetto e a tale scopo consideriamo il gas in tre successivi stati:

	Volume	Temperatura	Pressione
1°	V_0	0°	76 cm.
2°	V'	t°	76 cm.
3°	V	t°	H cm.

Per passare dal 1° al 2° stato occorre variare la temperatura del gas a *pressione costante*, quindi applicando la (1) del precedente paragrafo, avremo:

$$V' = V_o (1 + \alpha t) \qquad (1)$$

essendo α il coefficiente di dilatazione.

Per passare dal 2° al 3° stato occorre cambiare solo la pressione, perciò useremo la legge di Boyle e Mariotte; si ottiene:

$$V' : V = H : 76$$

ossia:

$$VH = 76\ V'.$$

Sostituendo a V' il valore dato dalla (1), abbiamo:

$$VH = 76\ V_0\,(1 + \alpha t)$$

cioè:

$$\frac{VH}{1 + \alpha t} = 76\ V_0\,.$$

Ora, se ci proponiamo di portare il gas in un altro stato, V_1, t_1, H_1, collo stesso processo otteniamo:

$$\frac{V_1 H_1}{1 + \alpha t_1} = 76\ V_0\,.$$

Le due ultime eguaglianze dànno per conseguenza:

$$\frac{VH}{1 + \alpha t} = \frac{V_1 H_1}{1 + \alpha t_1}$$

ossia:

$$\frac{VH}{1 + \alpha t} = \text{costante}\,.$$

È questa la *equazione caratteristica dei gas*, che dice: *comunque si cambi la temperatura e la pressione di una data massa di gas, il volume varia in modo che il prodotto del volume per la pressione diviso per il binomio di dilatazione è costante.*

82. Temperatura assoluta. — Se nella (2) del § 80 si sostituisce a β il valore teorico $\frac{1}{273}$, si ottiene:

$$H_t = H_0\left(1 + \frac{1}{273}\,t\right). \qquad (1)$$

Formola valida a tutte le temperature soltanto per un gas perfetto.

Ci domandiamo: a qual temperatura la pressione del gas risulterebbe eguale a zero? Serve per risolvere la questione la formola precedente, in cui si faccia $H_t = 0$; quindi la temperatura richiesta è la temperatura t che soddisfa all'equazione:

$$0 = H_0\left(1 + \frac{1}{273}\,t\right).$$

Da questa si rileva che, avendo H_o un valore finito, deve essere:

$$1 + \frac{1}{273}\, t = 0\,;$$

ossia:

$$t = -273^{o}.$$

La pressione di un gas perfetto si annulla dunque a -273^{o}, e quindi, per la teoria cinetica dei gas (83), a quella temperatura cessano gli urti delle molecole contro le pareti del recipiente e quindi il moto delle molecole. Si noti poi che, essendo il calore, secondo l'ipotesi più accreditata, dovuto ad un movimento delle molecole dei corpi, l'annullarsi della velocità di queste deve equivalere alla cessazione del calore. Vuol dire che un gas non può essere raffreddato al disotto di -273^{o}. In vista di ciò si può convenire di adottare questa temperatura, che è la più bassa di tutte, come *zero assoluto*, e contare da quel punto i gradi termometrici. Or la temperatura T^{o} di un corpo, contata a partire dallo zero assoluto, si chiama *temperatura assoluta* e si ottiene evidentemente sommando 273 all'indicazione t^{o} del comune termometro; avremo cioè:

$$T = t + 273.$$

83. Teoria cinetica dei gas - Moti browniani. — A dilucidazione di alcuni fatti esposti nei precedenti paragrafi, crediamo di dare una succinta esposizione della teoria cinetica dei gas. In varie occasioni s'è detto che i corpi sono formati di *molecole*, cioè di minutissime particelle, che per la loro estrema piccolezza sfuggono anche all'azione dei più potenti microscopi. Delle molecole la Scienza ha però, con geniali metodi di investigazione, calcolato l'ordine di grandezza, che risulta essere di un centimilionesimo di centimetro.

Le molecole dei corpi non sono però mai ferme, ma animate da continuo moto che si compie con velocità tanto maggiore quanto più alta è la temperatura; ma c'è questa differenza tra corpo e corpo: nei solidi le molecole descrivono una traiettoria che è o un segmento su cui vanno e vengono oscillando a mo' di un pendolo, o girano sopra un'orbita chiusa. Invece nei

liquidi e nei gas, dove le distanze molecolari sono molto maggiori che nei solidi, le molecole hanno maggior libertà di movimento e percorrono tra gli spazi intermolecolari movimenti in tutti i sensi, rimescolandosi e urtandosi ogni tanto fra loro. Tale movimento è anche detto *agitazione termica*, perchè la velocità media delle molecole cresce al crescere della temperatura, anzi, la *temperatura* nel vero senso fisico non è altro che la *velocità media molecolare.*

Dato tale stato di cose, è logico che nei gas, in particolar modo, le molecole urtino anche contro le pareti, che così sono soggette da parte di tali minuscoli proiettili a un continuo e vivo bombardamento, donde appunto deriva la *pressione* del gas contro le pareti.

Allo zero assoluto, come s'è già detto, un gas perfetto non esercita alcuna pressione sulle pareti, vuol dire che in tale condizione mancano gli urti molecolari e le molecole sono in perfetto riposo.

La velocità media delle molecole gassose è stata anche calcolata dai Fisici ed espressa dalla formola che qui riportiamo:

$$v = \sqrt{\frac{2aT}{m}}\,; \qquad (1)$$

nella quale a è una costante calcolabile colla formola:

$$a = 2{,}01 \times 10^{-16}; \qquad (2)$$

T è la temperatura assoluta del gas; m la massa della molecola.

Anche m è stata calcolata, e vale per essa la formola:

$$m = \frac{M}{6{,}06 \times 10^{23}}\,. \qquad (3)$$

In questa formola M è il *peso molecolare* della sostanza.

In base a tali dati calcoliamo la velocità media delle molecole dell'idrogeno alla temperatura di 0° C., cioè alla temperatura assoluta $T = 273°$. Per tale gas è $M = 2$; quindi si ha per la (3):

$$m = \frac{2}{6{,}06 \times 10^{23}} = 0{,}33 \times 10^{-23},$$

e per le (1) e (2):

$$v = \sqrt{\frac{2 \times 2{,}01 \times 10^{-16} \times 273}{0{,}33 \times 10^{-23}}},$$

ossia:

$$v = 182000^{\text{cm}} \text{ al secondo,}$$

cioè 1820^{m} al secondo.

L'energia cinetica molecolare $\frac{mv^2}{2}$ è quindi molto elevata nei gas portati ad alta temperatura per effetto dei forti valori che vi assumono le velocità molecolari, da cui derivano le forti pressioni sulle pareti dei recipienti.

Conseguenza delle cose anzidette sono i così detti *moti browniani*. All'agitazione termica possono anche partecipare dei piccolissimi corpi che si trovano eventualmente sospesi nel fluido. Molte sostanze, per es. le colle, e, in particolari condizioni, diversi metalli, possono rimanere sospesi nell'acqua, in forma di minutissime particelle, ma enormemente più grandi delle molecole; tali sospensioni si chiamano *soluzioni colloidali*. I corpuscoli sospesi possono vedersi con l'*ultramicroscopio* sotto forma di punti luminosi, e appariscono violentemente agitati dentro il liquido, descrivendo delle traiettorie a zig-zag di forma irregolare. Fu il Brown che scoprì tali particelle, d'onde il nome di movimenti browniani.

Che si tratti effettivamente di agitazione termica e non di movimento dovuto ad altre cause, è dimostrato da ciò, che dall'osservazione di tali movimenti si è potuto calcolare il valore della costante a della formola (2).

Calorimetria.

84. Quantità di calore e sua misura. — Osservammo già che la temperatura di un corpo non deve confondersi con la quantità di calore che esso possiede. Anche il calore è una grandezza suscettibile di misura con una unità scelta convenientemente. Ed è appunto la *calorimetria* il capitolo della Termologia che tratta di tale misura.

Il Congresso internazionale di Fisica del 1900 ha scelto, come *unità di quantità di calore*, la quantità di calore necessaria per innalzare da 14°,5 a 15°,5 centigradi la temperatura di un grammo-massa d'acqua sotto la pressione normale. Tale unità è detta *piccola caloria* o *caloria-grammo*. Nell'industria si usa spesso la *grande caloria* o *caloria-chilogrammo*, che è la quantità di calore necessaria per riscaldare da 14°,5 a 15°,5 un chilogrammo-massa d'acqua.

Nei processi dove non si richieda una grandissima precisione, riterremo che la piccola caloria sia la quantità di calore necessaria per riscaldare in media di 1° centigrado fra 0° e 100° un grammo-massa d'acqua, poichè la caloria sopra definita coincide con quest'ultima a meno di $\frac{2}{1000}$.

Nell'industria del freddo, oggi molto sviluppata, non altro che per semplicità di linguaggio, si usa come unità la *frigoria*, che invero non è una nuova unità; la si potrebbe chiamare *caloria negativa*. Le macchine frigorifere hanno per fine di sottrarre del calore, sicchè la loro potenza si misura dal numero delle calorie che *sottraggono*, ciò che equivale a dire, dal numero di frigorie che *producono* in un certo tempo.

85. Calore specifico. — Chiameremo *calore specifico, medio tra 0° e t°*, di un corpo, il numero di piccole calorie che bisogna comunicare ad un grammo-massa del detto corpo per riscaldarlo in media di 1° fra *0°* e *t°*.

Il calore specifico dell'acqua è perciò eguale a 1.

Se ora indichiamo con Q le piccole calorie che occorre comunicare ad un certo corpo della massa di M grammi per riscaldarlo da t°_1 a t°_2 e con c indichiamo il calore specifico medio tra t°_1 e t°_2, abbiamo evidentemente:

$$Q = cM\,(t_2 - t_1); \qquad (1)$$

cioè:

Le piccole calorie necessarie per operare il riscaldamento di un corpo sono misurate dal prodotto del calore specifico per la massa del corpo in grammi e per il salto di temperatura.

La stessa formola serve anche a misurare il calore che un corpo perde quando si raffredda.

Tale formola, è evidente, serve anche per l'acqua, basta farvi $c = 1$.

Risolvendo la (1) rispetto a c, si ha:

$$c = \frac{Q}{M(t_2 - t_1)} . \qquad (2)$$

Per conoscere dunque il calore specifico d'una sostanza bisogna conoscere i valori di M, Q, t_1 e t_2.

La bilancia ci fornisce il valore di M, i *calorimetri* i valori delle altre grandezze.

Fig. 240.

Fra i diversi calorimetri diamo una breve descrizione del calorimetro a ghiaccio, perchè il più semplice, sebbene non dia i migliori risultati. Lo si dice anche *a pozzetto di ghiaccio* perchè è formato di un blocco di ghiaccio, nel quale si opera prima una cavità sufficiente a comprendere il corpo che si sottopone all'esperienza, e di un altro blocco, spianato convenientemente, che copre la detta cavità (fig. 240).

Determinata la massa M in grammi del corpo, lo si riscalda in una stufa a secco fino ad una temperatura sufficientemente elevata $T°$, quindi lo si mette nel pozzetto, che viene subito chiuso. Il calore ceduto dal corpo viene in tal modo impiegato a fondere una certa quantità di ghiaccio. L'acqua risultante dalla fusione si raccoglie mediante una spugna e la si pesa. Se m è la sua massa in grammi, il numero di calorie occorse per la fusione è $79{,}7 \times m$, poichè si sa che per fondere un grammo di ghiaccio occorrono appunto 79,7 calorie. In tal modo il prodotto McT misura le calorie perdute dal corpo nel passare da $T°$ a 0°, e $79{,}7 \times m$ quelle occorse per la fusione degli m grammi di ghiaccio, d'onde l'equazione:

$$McT = 79{,}7 \times m ;$$

dalla quale si ricava:

$$c = \frac{79{,}7 \times m}{MT}.$$

86. Risultati generali relativi ai calori specifici dei solidi e dei liquidi. — 1° Il calore specifico di un corpo *cresce con la temperatura*; 2° il calore specifico di una sostanza allo stato liquido è maggiore che allo stato solido; 3° se si eccettua l'idrogeno, che ha calore specifico 3,41 allo stato gazoso e circa 6 allo stato liquido, l'acqua è il corpo che ha il *massimo calore specifico*; 4° nei diversi stati allotropici una data sostanza chimica ha un calore specifico differente; così il calore specifico del diamante tra 0° e 100° è 0,147; quello della grafite 0,202; del carbone amorfo 0,240. Il fosforo bianco ha calore specifico 0,189, il fosforo rosso 0,169.

87. Alcuni dati numerici.

Calori specifici di alcuni corpi comuni

verso 20°.

Alluminio	0,22	Acqua	1
Ferro	0,11	Mercurio	0,0331
Rame	0,09	Acetone	0,43
Stagno	0,055	Alcool	0,60
Ottone	0,09	Benzolo	0,43
Piombo	0,031	Petrolio	0,50
Vetro	da 0,16 a 0,19	Essenza di trementina	0,42

Calori specifici allo stato

	solido	liquido
Acqua	0,5	1
Bronzo	0,087	0,107
Fosforo	0,189	0,240
Piombo	0,032	0,040

88. Importanza dell'elevato calore specifico dell'acqua. — Abbiamo osservato che l'acqua è la sostanza che possiede il massimo calore specifico; l'acqua dunque richiede, per scaldarsi, a parità di condizioni, una quantità di calore notevolmente più grande che non gli altri corpi.

Le numerose applicazioni dell'acqua e la sua funzione nei fenomeni naturali, dànno a questo fatto un'importanza straordinaria.

Si utilizza l'acqua calda nei caloriferi, col sistema detto a *termosifone*, perchè l'acqua, raffreddandosi, cede una quantità di calore molto più grande di quella che potrebbe cedere qualunque altro corpo a parità di massa.

Le acque naturali, in contatto coll'atmosfera, compiono una funzione regolatrice della temperatura, cedendo molto calore quando quella tende ad abbassarsi e assorbendone, al contrario, quando tende ad innalzarsi. Così l'inverno sulle spiaggie è mite e l'estate non molto calda.

Nell'Irlanda, favorita anche dalla corrente del Golfo, l'inverno è più mite che nell'Alta Italia; il mirto colà vive all'aria libera; viceversa l'uva non arriva a maturazione per il troppo fresco d'estate.

Propagazione del calore.

Quando due corpi a diversa temperatura si trovano nello stesso ambiente, tende a stabilirsi l'equilibrio delle temperature per passaggio di calore dal corpo caldo al corpo freddo. La propagazione può avvenire: 1° per *conduttività*; 2° per *convezione* o *trasporto*; 3° per *irraggiamento*.

89. Conduttività. — In questo caso il calore passa per *contatto* dalle particelle calde a quelle fredde d'un corpo ed innalza la loro temperatura senza trasporto di materia e *senza cambiamento delle posizioni relative fra le molecole*.

Una sbarra di *ferro* arroventata ad una estremità è ancora molto calda a una grande distanza da tale estremità, specialmente se è grossa. Mentre una sbarra di *legno* può essere tenuta ad un estremo quando brucia dall'altra parte, e il calore non raggiunge la mano, nemmeno se l'asta è corta, com'è il caso dei fiammiferi.

Un cucchiaio *d'argento*, immerso a metà in un liquido caldo, si scalda rapidamente in tutta la sua lunghezza; un cucchiaio

di *legno*, al contrario, è appena caldo nella parte sporgente dal liquido. I manichi di legno delle caffettiere e delle theiere metalliche possono tenersi in mano, come avviene per le impugnature in legno dei ferri da stiro.

I metalli sono perciò detti *buoni conduttori* del calore; il legno, il sughero, il vetro sono *cattivi conduttori*.

È dovuto alla conduttività dei metalli e del marmo, se toccandoli sembrano freddi, perchè il calore della mano viene da tali corpi rapidamente sottratto e disperso nella loro massa, senza riscaldarli in modo apprezzabile. Poggiando invece la mano sopra una tavola di legno, si riscaldano soltanto i punti di contatto, che diventano subito caldi e perciò fanno giudicare il legno più caldo del metallo e del marmo.

Di tutti i corpi l'argento è il più buon conduttore, poi vengono gli altri metalli. I minerali, il vetro, la porcellana sono anche discreti conduttori; le sostanze di origine vegetale, come il legno, il sughero, il cotone, e le sostanze organiche animali, come i peli e la lana, conducono assai poco.

Vengono poi a grandissima distanza i liquidi.

I gas non hanno conducibilità sensibile.

90. Diversa conduttività dei metalli. — Si prendono due asticelle AB di ferro, AC di rame delle stesse dimensioni, disposte orizzontali l'una di seguito all'altra, con le estremità A piuttosto vicine. Al disotto delle due asticelle si fissano mediante cera delle pallottoline (fig. 241), e con una lampada si riscaldano contemporaneamente le estremità A. Si vedranno così gradualmente cadere, a cominciare dalle estremità riscaldate, delle pallottoline per effetto della fusione della cera, e dopo un certo tempo finirà la caduta, sia per l'una che per

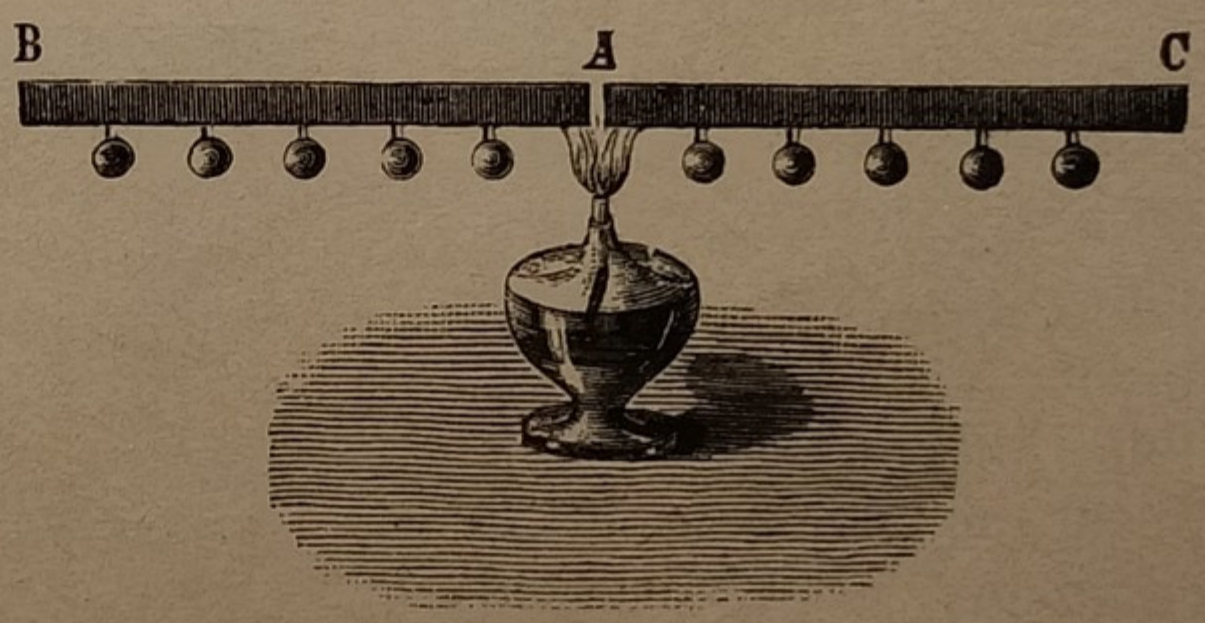

Fig. 241.

l'altra sbarra, ma si riscontrerà che dalla sbarra di rame si saranno staccate più palline che dalla sbarra di ferro.

Un'esperienza più concludente si può eseguire con l'apparecchio di Ingenhouz. Sopra la parete esterna di una scatola parallelepipeda di ottone sono piantate perpendicolarmente delle asticciole di diverse sostanze e dello stesso diametro (fig. 242), ricoperte di un sottile strato di cera. Versando dell'acqua bollente nella scatola, il calore si trasmette lungo le asticelle e fonde la cera, e si vede che la fusione si arresta dopo qualche tempo a distanze diverse sulle diverse asticciole.

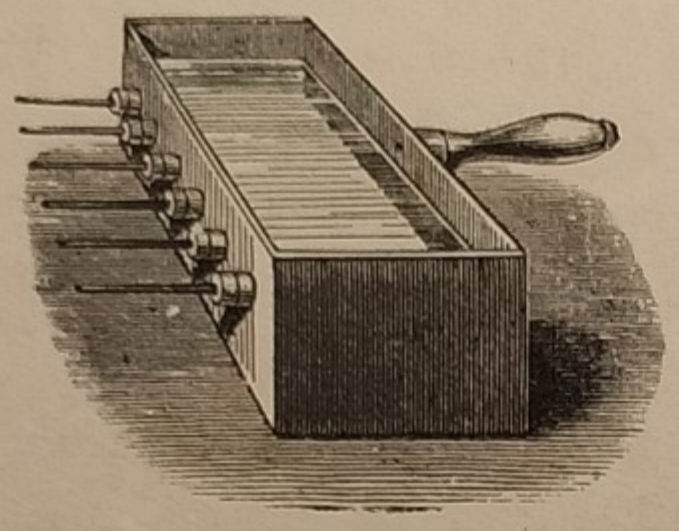

Fig. 242.

Ecco l'ordine di conduttività decrescente di alcuni metalli comuni: argento, rame, zinco, ferro, stagno, piombo. Nello stesso ordine troveremo schierati questi metalli anche nella conduttività elettrica.

91. Proprietà delle reti metalliche - Lampada di sicurezza. — La buona conduttività termica dei metalli spiega un particolare comportamento che hanno le reti metalliche rispetto alle fiamme. Una rete metallica appoggiata sopra una fiamma a gas (fig. 243 *a*) sottrae al gas una gran parte del suo calore, distribuendolo rapidamente in tutta la sua massa e disperdendolo rapidamente nell'aria. In tal modo la rete si arroventa qualche po', ma senza assumere la temperatura di accensione del gas, che va via incombusto attraverso le maglie della rete. Prova ne è che mettendo un fiammifero acceso sopra la rete, la fiamma si completa.

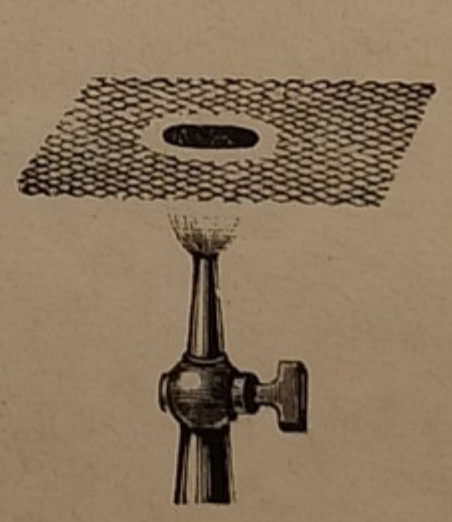

Fig. 243 *a*.

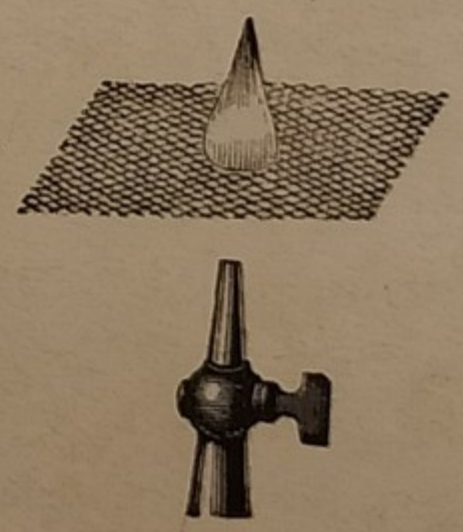

Fig. 243 *b*.

Se poi si pone la rete al disopra del becco dal quale il gas esce incombusto, si può accendere il gas sopra la rete (fig. 243 *b*) senza che l'accensione si propaghi al disotto.

Le reti metalliche hanno per tale proprietà ricevuto una importante applicazione nella *lampada di sicurezza* di Davy. Uno dei più gravi pericoli nelle miniere di carbon fossile dipende dallo sviluppo del *grisou*, che si accumula nella parte superiore delle gallerie, e, mescolato coll'aria, dà luogo, quando s'infiamma, a formidabili esplosioni. Investiti dalle fiamme dell'esplosione i minatori son bruciati vivi; ma quand'anche non perdano la vita in tal maniera, vengono asfissiati dall'anidride carbonica che si produce.

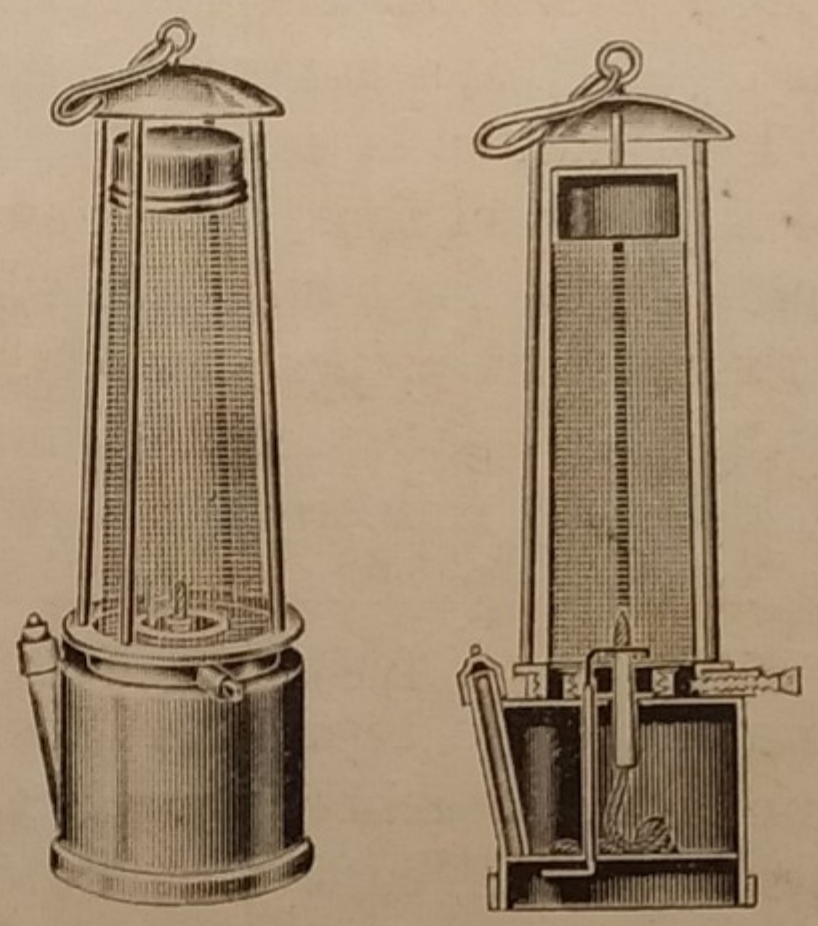

Fig. 244.

Prima che il Davy inventasse la sua famosa lampada il minatore doveva accontentarsi della luce prodotta dalle scintille che cavava dalla pietra focaia battuta coll'acciarino, poichè si sapeva che tali scintille erano incapaci di accendere il grisou.

La lampada Davy è in sostanza una lampada ad olio (fig. 244) la cui fiamma è circondata da un cilindro di rete metallica, chiuso in alto. Quando la lampada è alimentata dall'aria pura, la fiamma brucia coll'ordinario splendore d'una lampada ad olio; ma quando il minatore entra in un'atmosfera contenente il grisou, la fiamma si allarga, diventa fuligginosa per deficienza di ossigeno, scoppietta per l'accensione del grisou penetrato attraverso la rete. Da questi segnali il minatore è avvertito dell'imminente pericolo e procura di mettersi in salvo.

92. Conduttività assoluta o interna. — Nei fenomeni ora studiati intervengono degli elementi estrinseci alla conduttività, poichè i corpi presi in esame subiscono inevitabilmente delle perdite laterali di calore. In tali fenomeni si rileva solo la conduttività *apparente* dei corpi, che può mostrarsi diversa anche per la stessa sostanza.

Infatti, se nella prima esperienza descritta nel paragrafo 89, anzichè usare due aste di metalli diversi dello stesso diametro, se ne usano due dello stesso metallo, per esempio di rame, ma di diametro diverso, si riscontra che dalla asticella più sottile cadono meno palline di cera che dall'altra. Ciò perchè l'asticella più sottile perde lateralmente del calore ricevuto dalla sorgente una percentuale maggiore dell'altra, avendo, a parità di sezione, una superficie laterale più estesa.

Per studiare la conduttività *assoluta* o *interna* bisognerebbe realizzare una sbarra che non presentasse alcuna perdita laterale di calore, con gli estremi mantenuti ad una certa differenza di temperatura, per esempio, l'uno a 100° mettendolo a contatto con una vaschetta contenente acqua in ebollizione, e l'altro a 0° immergendolo nel ghiaccio fondente. In tal caso il calore resterebbe incanalato nella sbarra, come un liquido in un tubo a pareti impermeabili comunicante con due vasi contenenti un liquido a diversa altezza, e i corpi più buoni conduttori darebbero passaggio a un flusso di calore più abbondante dei cattivi conduttori.

La questione è così semplicemente prospettata, e non intendiamo di approfondirla.

93. Calorifughi. — Si chiamano con questo nome i corpi cattivi conduttori del calore, che hanno, come tali, delle applicazioni industriali.

Il difetto di conducibilità della lana, del feltro e simili veniva da molto tempo utilizzato nel Nord d'Europa, nella costruzione di un apparecchio, che si chiamava *pentola automatica* e che è stato largamente usato durante l'ultima guerra dai privati e in special modo dal nostro Esercito, col nome di *cassa di cottura*. È questa una scatola di legno — può servire alla meglio una comune scatola da panettone — foderata all'interno da un grosso strato di feltro, di lana o economicamente anche di quei sottili trucioli di legno che servono per imballaggi. Dentro la cassetta resta posto per una pentola di metallo, munita del suo coperchio, sopra il quale occorre mettere un cuscinetto di feltro o simile. La pentola si fa prima bollire sul fornello con dentro le vivande che si vuol cuocere, e subito

dopo la si pone nella cassetta, abbandonando l'apparecchio a se stesso. La cottura continuerà senza fuoco e dopo qualche ora sarà completa.

I calorifughi più usati nell'industria sono il sughero, l'amianto, il feltro, la segatura di legno, ecc. Coi detriti di sughero si fanno agglomerati di forma diversa, impiegati per preservare dal raffreddamento le condotte del vapore, e dal riscaldamento le camere dei frigoriferi, ecc.

94. Irradiazione. — È un processo di propagazione del calore che mette bene in rilievo la stretta relazione di origine fra il calore e la luce. L'irraggiamento termico si effettua anche attraverso il vuoto, come si può provare con un termometro collocato entro una grossa bolla di vetro in cui è fatto il vuoto (fig. 245) e posto in prossimità di una sorgente calorifica.

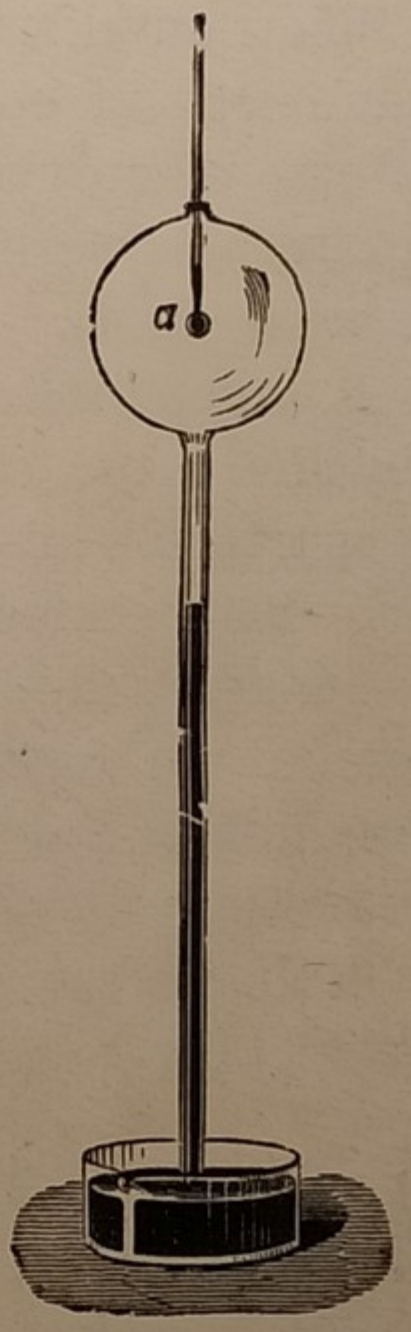

Fig 245.

Così arriva alla Terra attraverso il vuoto interplanetario il calore solare.

Il calore che si propaga in tal modo si chiama *calor raggiante* e possiede le proprietà caratteristiche di attraversare molte sostanze senza riscaldarle sensibilmente e di propagarsi rettilinearmente tutto intorno alla sorgente. Così noi chiamiamo *raggio calorifico* ognuna delle direzioni secondo cui avviene la propagazione.

Noi non possiamo qui addentrarci nello studio del calore raggiante, argomento che è stato trattato con rara abilità dal nostro fisico Macedonio Melloni di Parma; non lo possiamo, perchè tale studio ci sembra esorbitare i limiti di un programma elementare di Fisica, e anche perchè la trattazione adeguata del fenomeno presuppone la nozione di fenomeni ottici che verranno studiati più innanzi.

Ci limiteremo ad accennare che corpi caldi, messi in un ambiente meno caldo, irradiano calore. La quantità di calore

irradiata dipende dalla natura della superficie del corpo caldo, dalla natura e dalla pressione del gas ambiente e, a parità di altre condizioni, è *proporzionale alla superficie irradiante e all'eccesso di temperatura del corpo sull'ambiente*. È questa la così detta *legge di Newton* sul raffreddamento.

95. Convezione o trasporto del calore. — I liquidi e i gas sono cattivi conduttori; ma in essi il calore si propaga per effetto di movimenti molecolari che si destano nella loro massa quando si verificano degli squilibri di temperatura nelle loro diverse parti.

Avviene infatti che scaldando in un punto qualunque un liquido o un gas, ivi la densità diminuisce, e in conseguenza le particelle divenute più leggere salgono dentro il fluido *trasportando* con sè del calore.

In tal modo si trasmette verso il soffitto di una stanza il calore di un fornello; le parti dell'aria che vengono a contatto col fuoco, si scaldano e diminuendo di densità salgono in alto cedendo alle molecole fredde che incontrano il loro calore.

Tale ascesa provoca però la discesa delle particelle meno calde, che vengono ad occupare il posto delle prime, e riscaldandosi alla loro volta, dànno origine a due correnti: una più calda ascendente, e una meno calda discendente.

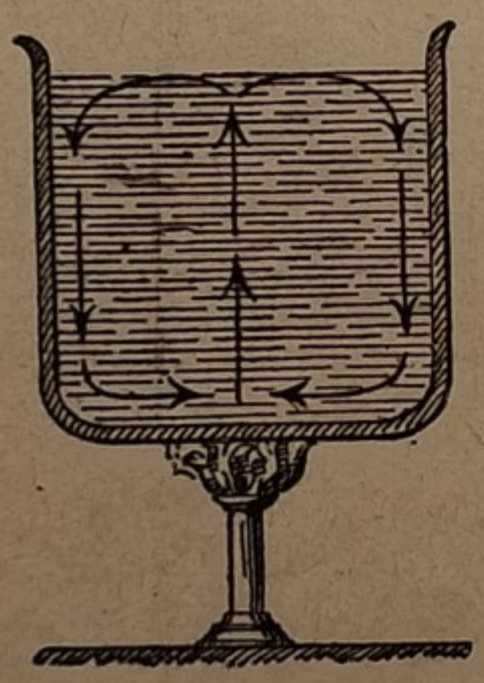

Fig. 246.

Il fenomeno si può mettere in evidenza scaldando dell'acqua, contenuta in un vaso di vetro, nella parte inferiore. I movimenti delle particelle, quello centrale in salita e quelli laterali discendenti lungo le pareti, risultano nettamente visibili immergendo nell'acqua della segatura di legno duro (figura 246).

Simile meccanismo di propagazione del calore si effettua, come si è accennato, nei gas; è perciò che la massa dei gas caldi, che entra nel camino di un focolare, s'innalza su per la canna, e richiama al disotto della griglia l'aria pura necessaria per attivare la combustione del combustibile.

96. Venti. — Non diversa è l'origine dei venti. Il vento è *aria in movimento* provocata da una differenza di pressione tra due masse d'aria vicine. Il vento soffia dalla regione dove la pressione è più elevata verso quella dov'è minore. Le differenze di pressione poi hanno origine principalmente da squilibrî di temperatura.

Infatti, sopra una superficie scaldata dal sole, l'aria diminuisce di densità e si solleva; così si manifesta una diminuzione di pressione, per cui l'aria circostante si mette in moto affluendo verso tale regione. Si ha così un vento superficiale che spira dalle regioni meno calde verso la regione più calda.

Cambiamenti di stato.

Noi riusciamo facilmente a fondere del ghiaccio, poi a far passare l'acqua di fusione allo stato di vapore. Per sottrazione di calore, otteniamo le trasformazioni inverse. Lo stesso corpo, per esempio l'acqua, può prendere successivamente i tre stati: solido, liquido, gassoso. Questo risultato è generale, com'era stato, oltre un secolo addietro, enunciato da Lavoisier: « lo stato solido, liquido ed aeriforme sono tre stati differenti della stessa materia, tre modificazioni particolari attraverso le quali possono passare successivamente quasi tutte le sostanze ».

All'epoca nella quale il celebre scienziato scriveva queste righe (1790), molte sostanze solide non erano ancora state fuse, e pochi gas erano stati liquefatti, e l'affermazione di Lavoisier poteva sembrare piuttosto arrischiata; ma oggi, in grazia alla potenza dei mezzi di cui disponiamo per produrre delle temperature assai basse ed assai elevate, le sostanze *refrattarie* sono state fuse, e i gas *permanenti* sono stati liquefatti, talchè le idee di Lavoisier sui cambiamenti di stato sono interamente giustificate.

97. Fusione e leggi. — La fusione è il passaggio dallo stato solido allo stato liquido.

Innalzando progressivamente la temperatura di un corpo, possono presentarsi diversi casi:

1° il corpo fonde bruscamente, ciò che avviene, ad esempio, per il ghiaccio, il fosforo, la naftalina, il piombo, ecc.; si ha allora la fusione *brusca*;

2° il corpo passa dallo stato solido allo stato liquido rammollendosi gradualmente; ad esempio, la ceralacca, il quarzo, il vetro, il ferro; la fusione si dice *pastosa*;

3° il corpo passa direttamente dallo stato solido allo stato di vapore; il fenomeno è detto *sublimazione*. Si comportano così la neve carbonica, l'arsenico ed altri corpi mantenuti alla pressione atmosferica. Tuttavia tali sostanze possono fondere operando a pressione sufficientemente elevata;

4° il corpo si decompone; ciò avviene per la maggior parte delle sostanze organiche, quali la cellulosa, la destrina, le materie albuminoidi. Per certi corpi si ha dissociazione, come avviene nel carbonato di calcio che non fonde se non in recipiente chiuso, nel qual caso i prodotti gassosi della dissociazione, accumulandovisi ed esercitando una considerevole pressione, si oppongono alla decomposizione completa del corpo, che raggiunge così la temperatura di fusione. Tale prova venne fatta scaldando del carbonato di calcio in una canna da fucile, chiusa da un tappo a vite.

Sostanze propriamente refrettarie non esistono; alla temperatura del forno elettrico — 3500° — si ottiene la fusione di tutti i corpi; tuttavia continuano a chiamarsi refrattari l'argilla, la magnesia, la calce, il carbone, il boro, il silicio, la silice, che non fondono al fuoco della forgia.

Riassumendo, tutti i corpi sono fusibili, eccettuati quelli che si decompongono col calore, o che sublimano nelle condizioni di pressione dell'esperienza.

Soltanto la fusione brusca è regolata da leggi precise, che sono:

1° *sotto una data pressione una sostanza chimicamente definita fonde a una temperatura determinata, diversa da sostanza a sostanza;*

2° *tale temperatura non varia, restando invariata la pressione, finchè tutto il corpo non sia interamente fuso.*

Questa temperatura costante, alla quale si inizia e si compie il fenomeno della fusione, chiamasi *temperatura* o *punto di fusione*, e se avviene alla pressione di un'atmosfera la chiameremo *temperatura di fusione normale.*

Ecco alcuni punti di fusione normale:

Mercurio	−38°,8	Argento	960°
Ghiaccio	0°	Oro	1063°
Stagno	232°	Rame	1083°
Piombo	327°	Ferro puro	1510°
Zinco	419°	Platino	1755°
Alluminio	658°	Iridio	2300°

Tungsteno verso 3000°.

98. Cambiamento di volume durante la fusione. — In generale i corpi *si dilatano bruscamente* durante la fusione, vale a dire la loro densità diminuisce; così, ad esempio, per il fosforo, per lo zolfo, ecc., le parti solide, durante la fusione rimangono sul fondo del vaso. Pochi corpi, al contrario, fondendo si *contraggono bruscamente*; così avviene per il ghiaccio che mentre sta fondendo galleggia sull'acqua; anche la ghisa, il bismuto e l'argento hanno lo stesso comportamento del ghiaccio.

Il ghiaccio a 0° ha una densità 0,916740 e l'acqua a 0°, una densità 0,999871. Perciò, facendo solidificare dell'acqua in recipiente chiuso, per effetto dell'aumento di volume che accompagna la congelazione, ne deriva un aumento enorme di pressione che il più delle volte è causa della rottura del vaso. In tal modo d'inverno si fendono i tubi di ferro dell'acqua potabile quando questa vi si congeli, e per la stessa ragione le roccie vengono ridotte in frammenti dall'acqua che gela nelle loro fenditure, e durante le primavere precoci, se si manifestano degli abbassamenti di temperatura, la linfa congelando nei vasi delle piante, li lacera.

I corpi che subiscono la fusione pastosa durante la fusione aumentano di volume, ma *gradualmente.*

99. Variazione del punto di fusione colla pressione. — Se la fusione non fosse accompagnata da alcun cambiamento di volume, la pressione non avrebbe influenza sul punto di fusione.

Ma se un corpo fondendo si *dilata*, un *aumento* della pressione esterna si oppone alla fusione, e ne *eleva* il punto di fusione; per un corpo invece che fondendo si *contrae*, un *aumento* di pressione facilita il fenomeno e ne *abbassa* il punto di fusione.

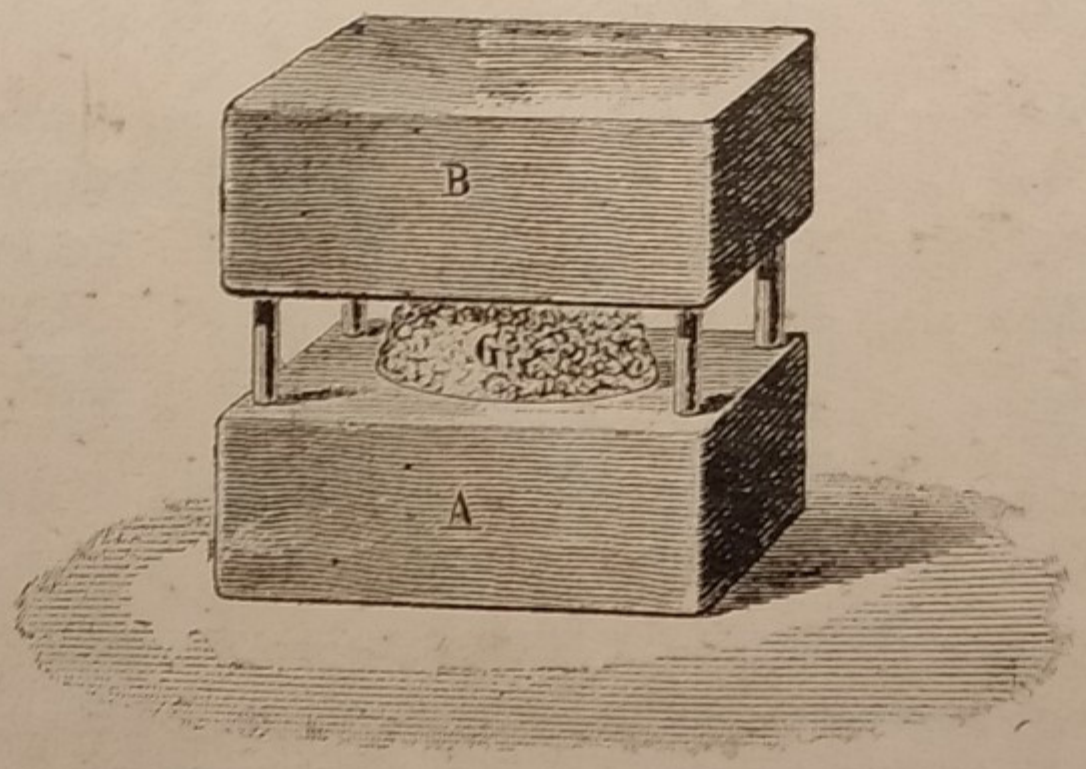

Fig. 247.

Per il ghiaccio si constata un abbassamento nel punto di fusione di $\frac{7,5}{1000}$ di grado per ogni aumento di 1 atmosfera di pressione, talchè a 134 atmosfere di pressione il ghiaccio fonde a — 1°.

L'abbassamento del punto di fusione del ghiaccio coll'aumento della pressione fu studiato con procedimenti su cui non possiamo fermarci; ci limiteremo a descrivere qualche esperienza scolastica che dimostra qualitativamente il fenomeno. Se si prendono dei frammenti di ghiaccio chiusi fra due forme scavate di legno duro (fig. 247), sottoposte a forte pressione anche con un semplice copialettere, la pressione determina la fusione d'una piccola quantità di ghiaccio nei punti di contatto, l'acqua di fusione invade gli interstizi e, sottratta così alla pressione, vi *rigela* riunendo i pezzi in un'unica massa di ghiaccio che ha la forma del modello in legno (fig. 248).

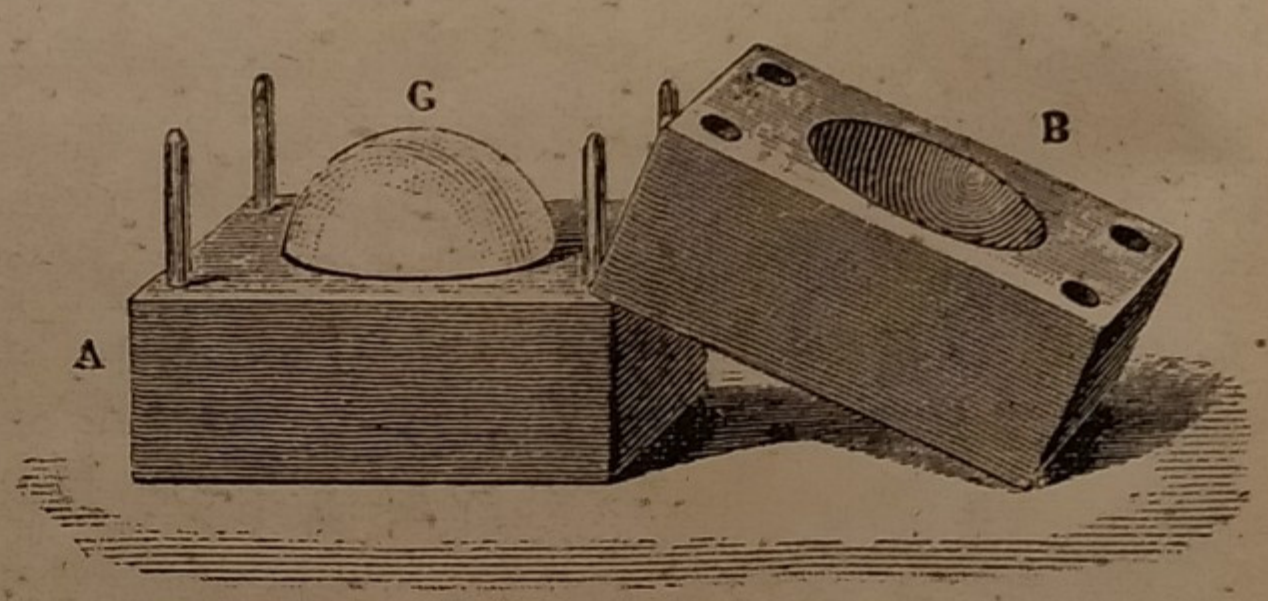

Fig. 248.

Un'altra esperienza che ha la stessa spiegazione si può eseguire disponendo a cavalcioni sopra un grosso pezzo di ghiaccio

un sottile filo di acciaio a cui è sospeso un grosso peso (fig. 249). Si osserva che il filo si affonda lentamente nel ghiaccio e lo attraversa completamente senza separarlo in due parti distinte.

Ciò avviene perchè nei punti direttamente premuti, ove la forza per unità di superficie è molto grande, il ghiaccio essendo a 0° o anche a temperatura qualche poco inferiore, passa allo stato liquido, poichè si trova a temperatura superiore a quella di fusione corrispondente alla pressione a cui è sottoposto. L'acqua che ne deriva sfugge alla pressione passando sul dorso del filo e vi rigela.

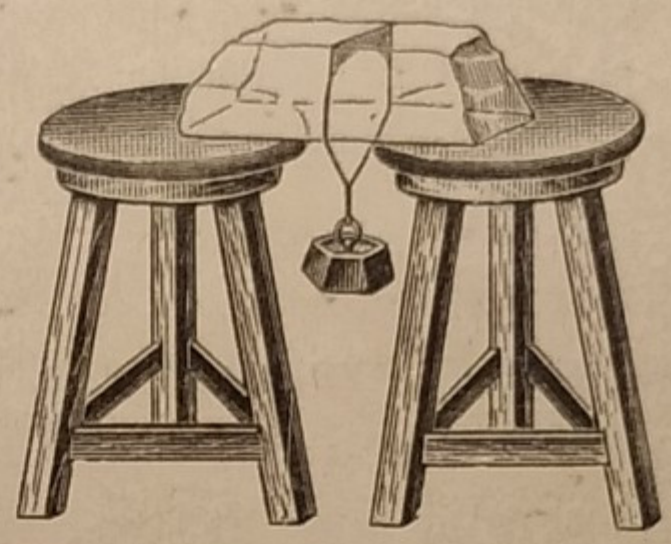

Fig. 249.

Così si può spiegare la formazione delle palle di neve che si ottengono premendo la neve soffice fra le mani e così anche è stato spiegato il fenomeno del movimento dei ghiacciai, fenomeno che una volta veniva attribuito alla plasticità del ghiaccio, che in verità non è affatto plastico.

Su tale fenomeno, detto di *rigelo*, ha richiamato l'attenzione per primo il Faraday nel 1850.

100. Solidificazione e surfusione. — La solidificazione è il fenomeno inverso della fusione, cioè il *passaggio dallo stato liquido allo stato solido per sottrazione di calore*. Tutti i liquidi convenientemente raffreddati solidificano, obbedendo alle seguenti leggi:

1° *La temperatura di solidificazione è la stessa della fusione;* il ghiaccio fonde a 0°, l'acqua solidifica a 0°.

2° *Durante la solidificazione, la temperatura della miscela del solido e del liquido, resta invariata*; per quanto rapida sia la sottrazione di calore, la temperatura non comincia ad abbassarsi se non quando la solidificazione è completa.

La surfusione è un *ritardo nella solidificazione* di un corpo che resta liquido a una temperatura inferiore al suo punto di fusione. Con particolari precauzioni si può raffreddare l'acqua fino a — 15° senza che solidifichi; occorre perciò che l'acqua

sia sottratta ad ogni agitazione, che sia disaerata mediante preventiva prolungata ebollizione, e protetta dal contatto dell'aria da uno strato d'olio. L'acqua contenuta in un tubo capillare può essere raffreddata fino a — 20° senza solidificare.

Il fosforo bianco fonde a 44°,2; ma fuso in un bicchiere sotto un piccolo strato d'acqua, può restar liquido fino a 20°.

Un liquido soprafuso solidifica portandovi in contatto *una particella solida della sostanza allo stesso stato molecolare.* Il fosforo soprafuso solidifica a contatto del fosforo bianco, mentre un frammento di fosforo rosso resta senza effetto. Un'azione meccanica, urto, scuotimento, determina anche la solidificazione.

La solidificazione di un liquido soprafuso ha luogo bruscamente e con sviluppo di calore, e al momento in cui la surfusione cessa, la temperatura sale e raggiunge di solito la temperatura di fusione.

Il fenomeno della surfusione è attribuito a uno stato di equilibrio instabile delle molecole, equilibrio che può essere rotto cogli artifizi sopra accennati.

101. Fusione delle leghe. — Le leghe possono considerarsi come soluzioni di un metallo in un altro; il loro punto di fusione è più basso di quelli dei metalli onde sono composte. E tutti sanno che se ne trae partito per saldare fra loro due pezzi. La saldatura deve essere più facilmente fusibile dei metalli da riunire insieme; così una lega formata con piombo e stagno, in modo che il peso di questo vi entri per due terzi, può servire benissimo a saldare oggetti di stagno. Si preparano alcune leghe, dette leghe di Darcet, di Wood, ecc., formate di *Bi*, *Sn*, *Pb*, *Cd*, che fondono a temperature anche inferiori a 100°, mentre lo *Sn*, che è il più fusibile dei componenti, fonde a 232°. Una lega formata con 80 parti di *Bi*, 30 di *Sn*, 50 di *Pb* e 20 di *Hg*, fonde a 53°.

102. Applicazione della fusione e della solidificazione.

1° Lo zero della comune scala termometrica si determina, com'è noto, approfittando della costanza della temperatura di fusione del ghiaccio.

2° L'estrazione di molti metalli dai loro minerali si fa per fusione; così si opera anche per lo zolfo.

3° Industrialmente si preparano oggetti di ghisa, di bronzo, ecc., ottenuti versando il metallo liquido in stampi.

4° La fusione pastosa del vetro viene utilizzata per la fabbricazione degli oggetti di vetro soffiato.

5° I *coni di fusione* Seger sono piccoli coni o piramidi di smalto di diversa composizione sì da fondere a temperature determinate, comprese fra i 600° e i 1800° e servono a determinare con grande esattezza la temperatura dei forni destinati specialmente alla fabbricazione dei vetri e alla cottura delle ceramiche.

103. Evaporazione - Tensione massima del vapore d'acqua e di altri liquidi. — L'evaporazione è il passaggio di un liquido allo stato aeriforme e può avvenire a qualunque temperatura. La rapidità però con cui il passaggio si effettua, dipende dalla natura della sostanza, e cresce coll'aumentare della temperatura e col diminuire della pressione che regna nell'ambiente.

Se questo è limitato, qualunque sia il liquido e la temperatura, è anche limitata la quantità di vapore che può formarvisi. Mano a mano che il liquido evapora cresce la pressione o tensione del vapore, però solo fino ad un limite quando lo spazio è saturo, o, come più spesso si dice, il vapore è *saturo*; in modo che se c'è ancora del liquido presente, questo non evapora ulteriormente. La tensione raggiunta dal vapore in tali condizioni si dice *tensione massima* o *tensione del vapor saturo*, e dipende solo dalla natura del liquido e dalla temperatura e non dal fatto che l'ambiente sia inizialmente vuoto o occupato da un altro aeriforme, nè dal volume concesso al vapore.

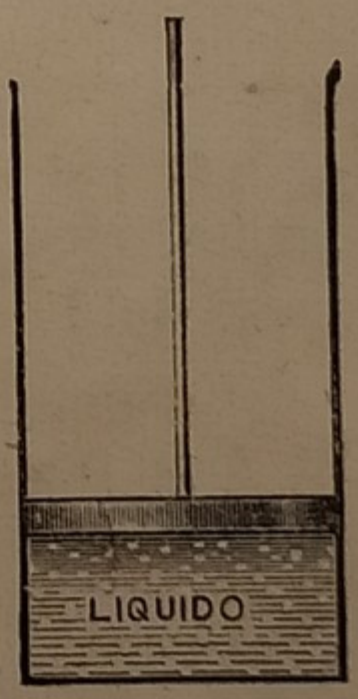

Fig. 250.

Per intendere quest'ultima circostanza si supponga di avere un tubo cilindrico con del liquido sul fondo; sopra il liquido poggia uno stantuffo a perfetta tenuta (fig. 250). Portando lo

stantuffo fino all'altezza C (fig. 251 a) si osserva che lo spazio AC, fra il liquido e lo stantuffo, si riempie di vapore. Sollevando ancora lo stantuffo fino in C' (fig. 251 b) lo spazio occupato dal vapore aumenta, ma se con un processo qualunque ne misuriamo la pressione, troveremo che questa rimane inalterata purchè non cambi la temperatura. La pressione rimane anche inalterata abbassando lo stantuffo fino in C'' (fig. 251 c). Nei

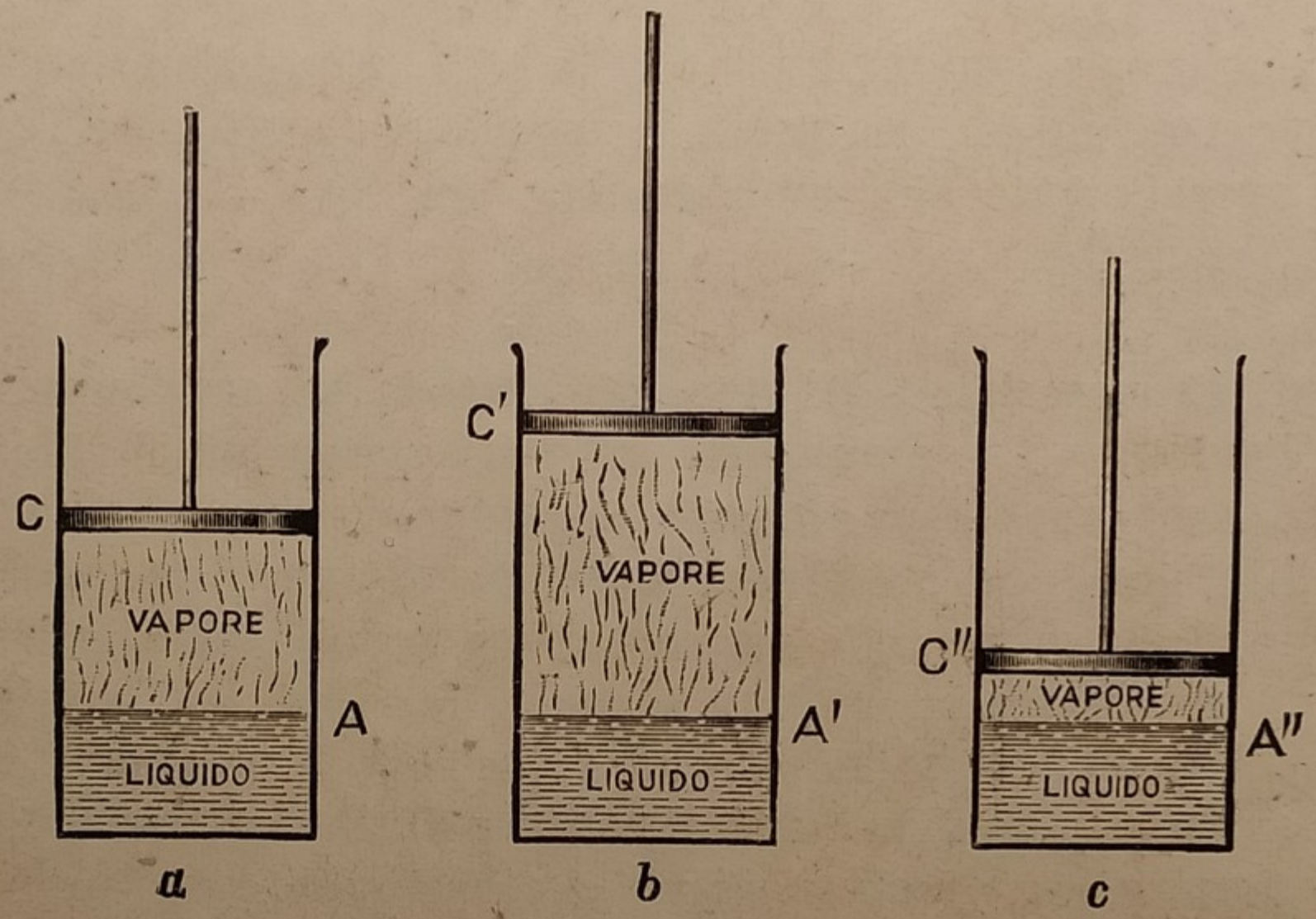

Fig. 251.

diversi casi varia solo la quantità di vapore che si forma a spese del liquido presente.

Un vapore *non saturo* si dice anche *secco* o *soprariscaldato*. In tali condizioni il vapore segue approssimativamente la legge di Boyle e Mariotte e quella di Gay-Lussac.

104. Tensione massima del vapore d'acqua e di altri liquidi. — Per l'importanza che ha la questione nello studio di molti fenomeni, crediamo opportuno di riferire i valori della tensione massima del vapor d'acqua a diverse temperature. Accurate determinazioni furono fatte dal Régnault, che estese le sue ricerche da $-30°$ a $130°$, e i risultati sono raccolti in

tabelle che sono riportate in tutti i Testi di Fisica di una certa estensione. Noi ci limitiamo qui a riportare pochi dati. La tensione è espressa in millimetri di mercurio, da 0° a 200° e in centimetri di mercurio da 200° a 360°. I numeri si riferiscono a Thiesen e Scheel da 0° a 50°, a Holborn e Henning da 50° a 200°, al Battelli da 200° a 360°.

Temperature in centigradi	Tensione in mm. di mercurio	Temperature in centigradi	Tensione in mm. di mercurio	Temperature in centigradi	Tensione in mm. di mercurio	Temperature in centigradi	Tensione in cm. di mercurio	Temperature in centigradi	Tensione in cm. di mercurio
— 20	0,96	45	71,66	120	1488,9	200	1162,5	290	5867
— 15	1,45	50	92,30	130	2025,6	210	1426	300	6762
— 10	2,16	55	117,85	140	2709,5	220	1738	310	7750
— 5	3,17	60	149,19	150	3568,7	230	2078	320	8834
0	4,58	65	187,36	160	4633	240	2517	330	10022
5	6,54	70	238,53	170	5937	250	2995	340	11383
10	9,21	75	289,0	180	7514	260	3576	350	12692
15	12,78	80	355,1	190	9404	270	4337	360	14187
20	17,51	85	433,5	200	11647	280	5060		
25	23,69	90	525,8						
30	31,11	95	634,0						
35	42,02	100	760,0						
40	55,13	110	1074,5						

Da questa tavola si constata che la tensione massima del vapor d'acqua, quasi nulla a 0°, diventa 1 atmosfera a 100°; 2 atmosfere a 120°; 3 atmosfere verso i 135°; 5 atmosfere poco sopra a 150°; 10 atmosfere a 180°; 16 atmosfere a 200°; 20 atmosfere a 215° circa.

Tensione massima di altri vapori in mm. di mercurio.

Temperatura in centigradi	Alcool etilico	Etere solforico	Benzolo	Temperatura in centigradi	Anidride carbonica (atmosfere)
0	12,6	184,9	26,5	0	34,3
10	23,8	291,8	45,2	5	39,0
20	44,0	442,4	74,1	10	44,2
30	78,2	647,0	117,5	15	50,0
40	134	921,2	180,2	20	56,3
50	221	1276,1	268,9	25	60,3
60	350	1728	380,5	30	70,7
70	542	2294	548,2	31,35	72,9
80	812	2991	755		
90	1188	3840	1016		
100	1695	4859	1344		

105. Ebollizione. — Se si riscalda gradualmente un liquido in un recipiente aperto, da principio avviene l'evaporazione soltanto alla superficie, e a un certo momento *la temperatura cessa di salire* e avviene l'*ebollizione*, cioè *una produzione di bolle di vapore in seno al liquido.*

Il fenomeno è regolato dalle seguenti leggi:

1° *Sotto una data pressione, l'ebollizione ha luogo a una temperatura determinata, costante per ciascun liquido.*

Questa temperatura si chiama *punto di ebollizione*. Il punto di ebollizione è detto *normale* sotto la pressione di 76 cm. di mercurio. Ecco alcuni punti di ebollizione normali:

Elio	— 268°,7	Anidride carbonica .	— 78,4
Idrogeno	— 252,6	Anidride solforosa . .	— 10
Azoto	— 195,6	Etere etilico	34,6
Ossigeno	— 183	Alcool assoluto . . .	78,25

Acqua	100°	Cadmio	766
Fosforo bianco . .	280,5	Zinco	918
Mercurio	356,8	Ferro	2450
Zolfo (monoclino) .	444,5	Tungsteno (nell'arco elettrico).	

2° *Durante l'ebollizione*, malgrado la somministrazione di calore operata dalla sorgente, *la temperatura del liquido rimane costante*, se la pressione non varia.

Queste due leggi si possono verificare con un termometro.

3° *L'ebollizione di un liquido si produce quando esso possiede tale temperatura a cui il suo vapore saturo ha una tensione eguale alla pressione soprastante.* Ciò deriva dalle seguenti considerazioni. Attaccate alle pareti del recipiente, che contiene il liquido, ci sono sempre delle minutissime bollicine d'aria; consideriamo una di queste bolle; essa è centro di formazione di vapore che si svolge dal liquido circostante e la riempie saturandola; cosicchè possiamo ammettere che essa è sollecitata a gonfiarsi per opera della tensione massima F che compete al vapore acqueo alla temperatura a cui l'acqua si trova. D'altra parte sulla superficie esterna della bolla agisce la pressione atmosferica H trasmessa attraverso il liquido in grazia al principio di Pascal e la pressione idrostatica h, per cui la bolla è sollecitata a contrarsi.

Ma la pressione interna della bolla è costituita, oltre che dalla pressione F del vapore, anche dalla pressione dell'aria; per conseguenza la bolla prende tal volume per cui la somma di F con la pressione dell'aria interna sia eguale ad $H + h$.

Se ora si aumenta la temperatura, F cresce, come già sappiamo (103), mentre $H + h$ rimane invariata, e per un certo valore della temperatura raggiunto dal liquido, F risulterà eguale ad $H + h$. In tali condizioni la pressione interna supera la pressione esterna a cui la bolla è sottoposta, e ne succederà che essa si gonfierà senza limite, a spese del vapore che vi si va formando, e allora l'adesione non basterà più a trattenerla sulle pareti, ma sarà trascinata verso l'alto dalla spinta dovuta al principio di Archimede, fino ad aprirsi la via nell'aria

libera. Tutte le altre bolle si comportano nello stesso modo. e l'acqua entra in ebollizione.

106. Soprariscaldamento. — A conferma della precedente interpretazione data al fenomeno dell'ebollizione, è dimostrato che se un liquido viene con speciali cautele disaerato, si ha un *ritardo nell'ebollizione*; infatti, per l'acqua sottoposta alla pressione normale, la temperatura può benissimo salire di 1 o 2 gradi sopra 100 senza che si abbia ebollizione. Ma se allora si immerge nel liquido una bolla d'aria, affondandovi una piccola campanella di vetro posta all'estremità di una bacchetta di vetro *t* (figura 252), si vedono subito delle bolle di vapore formarsi a contatto della bolla d'aria, e contemporaneamente la temperatura diminuire e fissarsi a 100°: l'ebollizione diviene allora normale. Per produrre il fenomeno basta una quantità d'aria estremamente piccola, tanto che il Gernez ha mostrato che una bolla d'aria di 1^{mm^3} può dar origine a 500.000 bolle di vapore, con tutto che ogni bolla di vapore porti via con sè una piccola quantità d'aria.

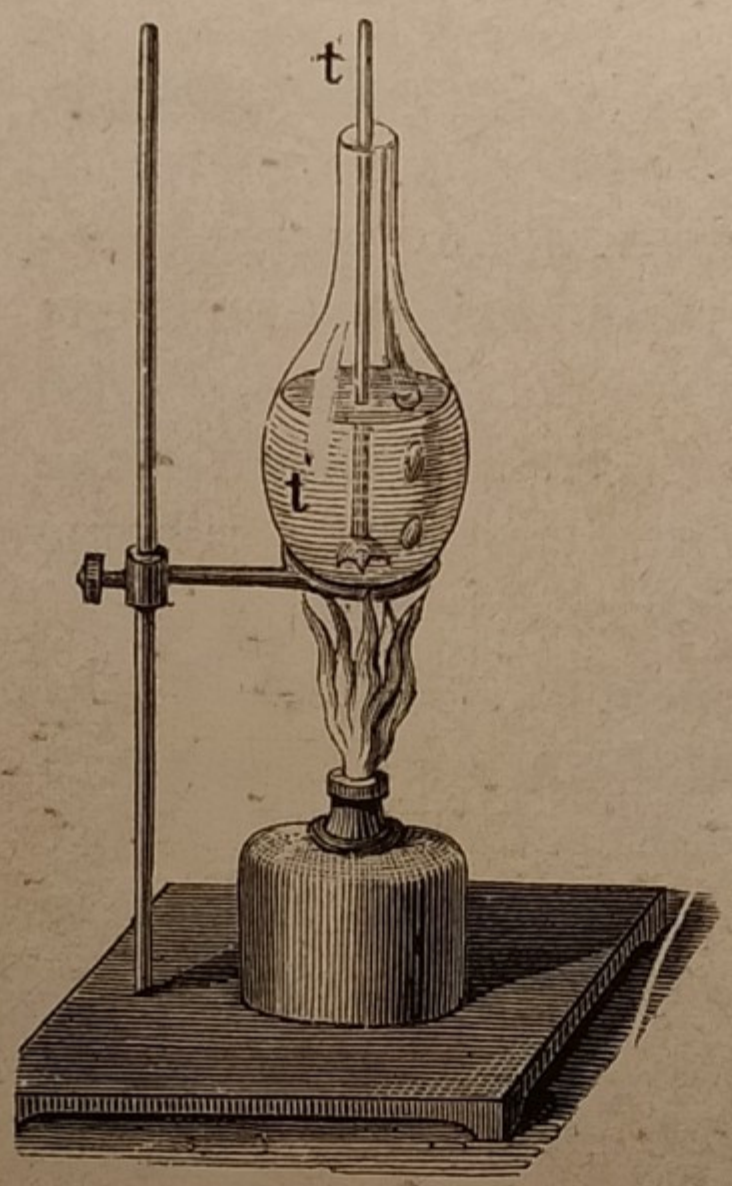

Fig. 252.

Lo stesso effetto, ottenuto coll'immersione della bollicina d'aria, si ottiene proiettando nel liquido soprariscaldato un pezzetto di spugna di platino, o anche di un corpo qualunque; ciò è dovuto allo strato d'aria che il corpo porta sempre aderente alla sua superficie.

107. Influenza della pressione sulla temperatura di ebollizione. — In virtù della terza legge dell'ebollizione un liquido bolle a temperature diverse al variare della pressione e precisamente la temperatura varia in senso diretto della pressione. Limitiamoci a qualche esperienza sull'acqua.

Prendiamo un pallone di vetro B pieno per circa $\frac{1}{3}$ d'acqua (fig. 253), e facciamola bollire per qualche tempo finchè il vapore abbia scacciato tutta l'aria. Mentre l'acqua bolle, tappiamolo e capovolgiamolo, immergendone la bocca in una vasca d'acqua. L'ebollizione cessa, ma se poi raffreddiamo in un modo qualunque la parte superiore del pallone, versandovi sopra dell'acqua fredda, vediamo che l'acqua ricomincia a bollire. Ciò avviene perchè il raffreddamento del pallone produce la condensazione di una parte del vapore e una conseguente diminuzione della pressione sull'acqua.

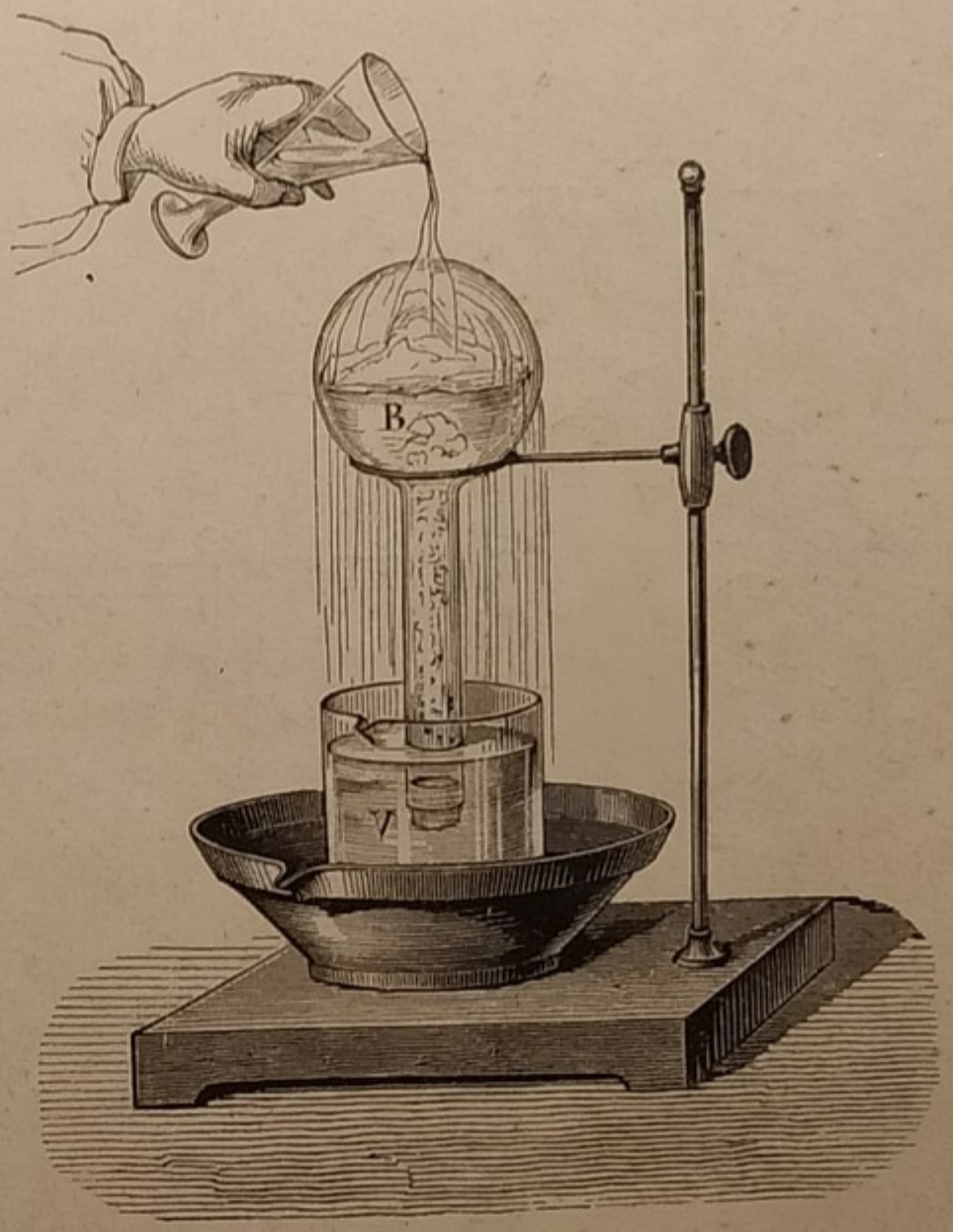

Fig. 253.

Si può ottenere lo stesso risultato scaldando quasi fino all'ebollizione dell'acqua in una boccia di vetro; unendo l'apertura di questa con una macchina pneumatica, si vede l'acqua mantenersi a lungo in ebollizione.

Sempre in virtù della terza legge dell'ebollizione si può desumere la temperatura di ebollizione dell'acqua sotto una determinata pressione, ricorrendo alla tabella che dà la tensione massima del vapor d'acqua alle varie temperature (103).

Così, ad esempio, sul Monte Bianco, dove la pressione media è di circa 42 ^{cm}, il Tyndall nell'agosto 1859 trovò che l'acqua bolliva a 84°,97.

In media per un elevamento di 324 m. corrisponde l'abbassamento di 1° nella temperatura di ebollizione dell'acqua; di guisa che dalla temperatura alla quale l'acqua bolle, si può

approssimativamente dedurre l'altezza del luogo di osservazione.

In una prossima esperienza vedremo l'acqua bollire a 0° e nello stesso tempo solidificare.

Per contro, esercitando sull'acqua una pressione superiore a 76 cm., il punto di ebollizione si eleva sopra 100°. Ciò si dimostra colla *pentola di Papin* (fig. 254); essa consiste in un robusto recipiente di bronzo, contenente acqua, chiuso ermeticamente da un coperchio premuto con una vite contro l'apertura superiore. Questo coperchio porta una *valvola di sicurezza*, cioè una specie di tappo poggiante sopra un foro del coperchio, premutovi da un contrappeso che si può spostare sopra una leva di 2° genere.

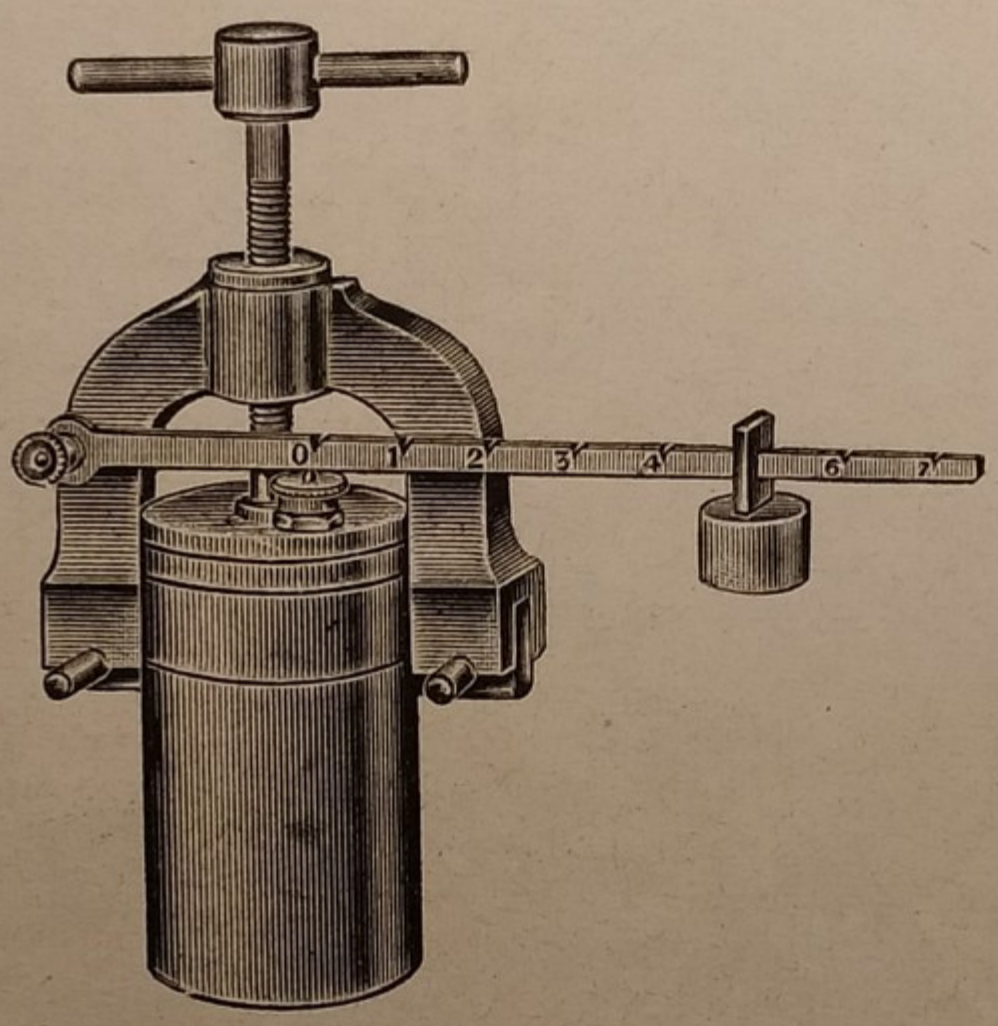

Fig. 254.

Riscaldando l'acqua, aumenta rapidamente la pressione del vapore, finchè ad un certo momento la valvola si apre. Da quell'istante la pressione non potendo aumentare, resta immutata anche la temperatura raggiunta dall'acqua, e questa temperatura assumerà dei valori più o meno elevati al disopra di 100° secondo che, regolando la valvola, il vapore potrà assumere una pressione più o meno alta sopra i 76 cm.

Se si regola la valvola in modo che il vapore possa raggiungere 5 atmosfere, la temperatura dell'acqua si fissa verso i 150° (103).

A queste temperature elevate l'acqua ha un potere dissolvente assai maggiore che a temperature più basse. Perciò industrialmente tali apparecchi col nome di *digestori* sono usati per l'estrazione della gelatina dalle ossa, e col nome di *autoclavi* sono impiegati per sterilizzare. Di piccoli autoclavi si

giovano i farmacisti per sterilizzare le fialette per iniezioni ipodermiche.

E prima di chiudere questo argomento, riferendoci ad una osservazione fatta quando si parlò della determinazione dei punti fissi nei termometri (69), aggiungiamo che nel punto dove si arresta il mercurio nel cannello quando il termometro è immerso nei vapori dell'acqua bollente, bisognerà segnare il valore della temperatura di ebollizione dell'acqua alla pressione segnata in quel momento dal barometro, temperatura che è data da tabelle più complete di quella riportata al § 103.

108. Distillazione semplice e frazionata. — Quando mediante l'ebollizione si trasforma in vapore un liquido o una mescolanza di liquidi, e si condensa in un'altra parte dell'apparecchio il va-

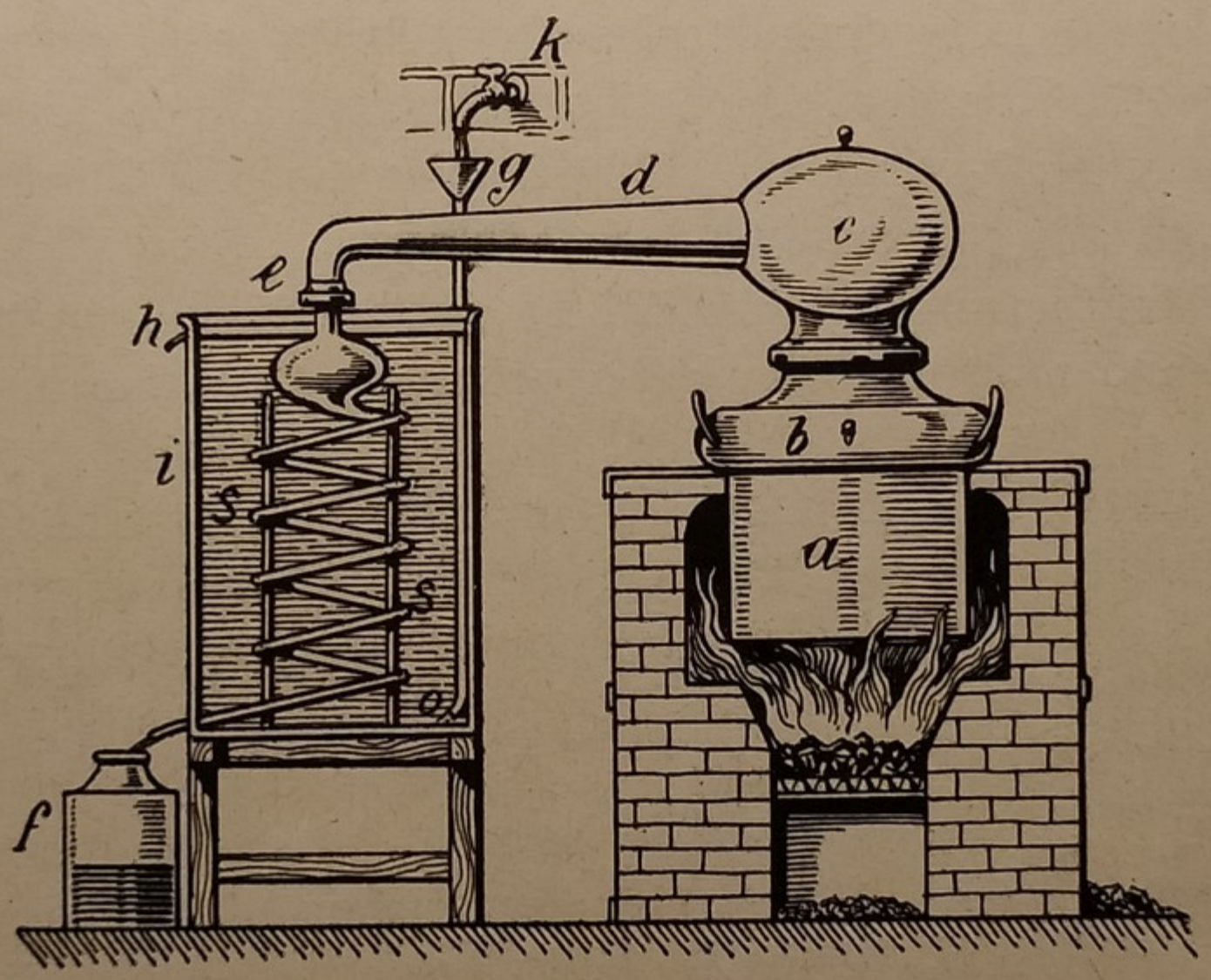

Fig. 255.]

pore, in modo da separare il liquido in ebollizione dal liquido condensato, si ha la *distillazione*. L'operazione ha per iscopo di purificare un liquido separandolo dalle sostanze che tiene disciolte, o ancora per separare l'un dall'altro dei liquidi diversamente volatili.

Come esempio di distillazione semplice, possiamo citare la preparazione dell'acqua distillata. L'apparecchio usato si chiama *alambicco* (fig. 255). L'acqua della *caldaia a* viene portata

all'ebollizione; il vapore arriva nel *duomo* C, poi in un tubo a serpentino SS, immerso in acqua fredda che si rinnova continuamente facendo arrivare una corrente di acqua fredda mediante il tubo *go* nella parte inferiore della vasca *i*. L'acqua riscaldandosi a spese del calore abbandonato dal vapore che si condensa nel serpentino, diventa più leggera, sale ed esce dal tubo *h*. L'acqua distillata viene raccolta in *f*, i sali disciolti restando nella caldaia.

Colla distillazione *frazionata* si possono separare da una mescolanza liquidi diversamente volatili. Distillando, ad es., una mescolanza di due liquidi L ed L_1 i cui punti di ebollizione sono 50° e 100°, scaldando a 50° si sviluppano solo i vapori di L, che si condensano. Se si continua poi a scaldare, L_1 distilla a sua volta a 100°.

Tale operazione viene impiegata su larga scala per i petroli. Tra 45° e 70° distilla l'etere di petrolio; tra 120° e 150° la benzina comune; tra 150° e 280° il petrolio da illuminazione; a 400° gli olii pesanti e la paraffina.

Se le temperature di ebollizione dei due liquidi mescolati L ed L_1 sono molto vicine, nella prima parte di liquido distillato si trova il liquido L e una piccola parte di L_1. Ripetendo la distillazione sul liquido ottenuto, si ha tutto L e una porzione più piccola di prima di L_1, e così continuando si arriva ad ottenere L quasi puro. Così si *rettifica* l'alcool per ottenerlo privo d'acqua.

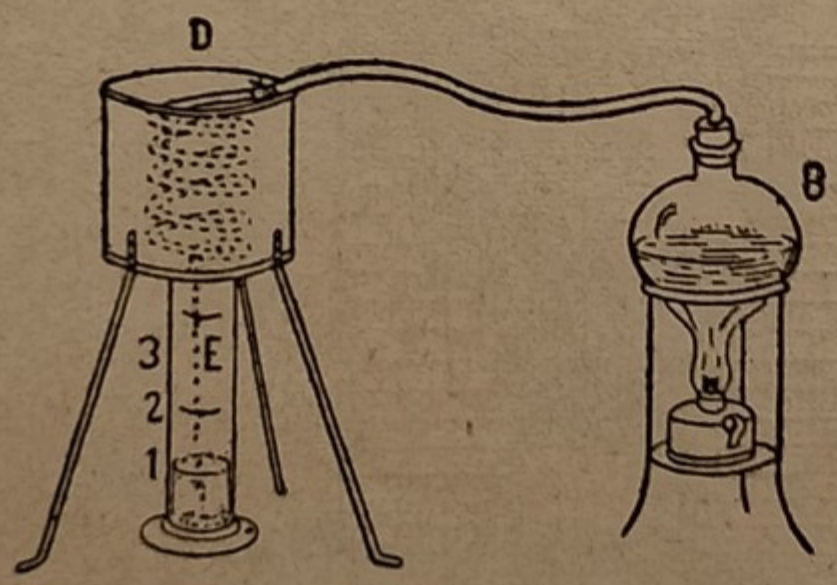

Fig. 256.

Esistono tuttavia degli apparecchi speciali con cui si arriva più rapidamente al risultato voluto.

Per determinare il grado alcoolico del vino se ne fa la distillazione mediante l'alambicco di Salleron (fig. 256) da B in E. L'alcool si ritrova tutto nel primo terzo di liquido condensato; sicchè, completando con acqua pura il volume iniziale e determinando la densità della mescolanza acqua-alcool, otte-

nuta, con un alcoolometro (V. pag. 137), si ha il grado alcoolico del vino.

Notiamo infine che per purificare, mediante distillazione, dei liquidi che verrebbero decomposti dal calore a una temperatura inferiore alla temperatura normale di ebollizione, si abbassa la temperatura di ebollizione abbassando la pressione negli apparecchi di distillazione. Si opera allora la così detta *distillazione nel vuoto.*

109. Liquefazione - Temperatura critica. — La liquefazione è il passaggio di un aeriforme allo stato liquido.

Tutti gli aeriformi possono essere liquefatti, occorre però conoscerne la *temperatura critica.* Verso la metà del secolo passato diversi Fisici si occuparono della liquefazione dei gas; da notare il Faraday, che fin dal 1845 arrivò a liquefare tutti i gas allora conosciuti, tranne i sei seguenti: *idrogeno*, *ossigeno*, *azoto*, *ossido di carbonio*, *biossido di azoto* e *metano.* Tali gas vennero in quell'epoca chiamati gas *permanenti.*

L'Andrews nel 1869, dopo una serie di ricerche sistematiche sul comportamento dei gas facilmente liquefacibili, e in particolar modo sull'anidride carbonica, riuscì a scoprire che *ogni aeriforme possiede una temperatura caratteristica*, detta *temperatura critica*, *al di sopra della quale la sostanza non può esistere che allo stato gasoso.*

Ciò spiega perchè i gas sopra nominati avevano resistito a temperature di -100° e alla pressione di parecchie centinaia di atmosfere; essi infatti possiedono temperature critiche inferiori a -100°. Talchè, se si vuol liquefare un gas, occorre prima portarlo a temperatura non superiore alla critica, meglio al di sotto, e comprimerlo convenientemente. Quanto più bassa è la temperatura cui il gas è portato, tanto minore è la pressione che occorre esercitarvi per liquefarlo.

Si chiama poi *pressione critica* di un gas la pressione alla quale occorre portare il gas per liquefarlo quando possiede la temperatura critica. Temperatura critica e pressione critica si

chiamano *costanti critiche*. Alcuni valori sono riportati nella tabella che segue:

	Temperatura critica in centigradi	Pressione critica in atmosfere		Temperatura critica in centigradi	Pressione critica in atmosfere
Azoto	— 147,3	33,49	Anidride carbonica . .	31	73,05
Biossido di azoto	— 93,5	71,2	Ossido di carbonio . . .	— 138,7	34,6
Elio	— 268,1	2,75	Gas ammonico	132,9	112,30
Idrogeno . . .	—239,91	12,80	Etilene . . .	9,5	50,65
Ossigeno	— 118,8	49,71	Anidride solforosa . . .	157,15	77,65
Acqua	364,3	194,6	Metano . . .	— 82,85	45,6

Da un esame anche sommario di questa tabella possiamo scorgere che ci sono dei gas *facilmente*, altri *difficilmente* liquefacibili. Chiameremo facilmente liquefacibili quelli che hanno temperatura critica superiore a 0° o non molto inferiore; e difficilmente liquefacibili quelli che hanno temperatura critica molto bassa.

Nella tabella sono notati insieme con alcuni gas comuni anche dei liquidi; non deve sorprendere il fatto.

Dalla tabella si rileva, ad esempio, che l'acqua ha una temperatura critica di 364°,3; ciò significa che al disopra di 364°,3 l'acqua può esistere soltanto allo stato gassoso.

E a questo punto cade anche opportuno di fare la vera distinzione degli aeriformi in *vapori* e *gas*. *Vapore* è l'aeriforme che si trova al *disotto* della sua temperatura critica; così l'anidride carbonica alla temperatura ordinaria, che di solito è inferiore a 31°, è un vapore. Invece *gas* è l'aeriforme che possiede una temperatura superiore alla critica.

I processi, dunque, messi in opera per la liquefazione degli aeriformi sono diretti a portare l'aeriforme al disotto della temperatura critica e a comprimerlo convenientemente.

110. Liquefazione dei gas facilmente liquefacibili. — Come tipo di questi gas prenderemo l'anidride carbonica, che ha la temperatura critica di 31°. Per liquefarla, un compressore la aspira allo stato gassoso e la comprime in bombole di acciaio (fig. 257). Il tubo che unisce il compressore alla bombola è piegato a zig-zag ed è abbondantemente irrorato da getti di acqua fredda. Con ciò viene sottratto al gas compresso il calore che si genera per effetto della compressione e la temperatura viene mantenuta al di sotto di 31°. Se, ad esempio, la temperatura della bombola viene mantenuta a 25°, basta una pressione di 60 atmosfere circa per ridurlo liquido.

Fig. 257.

Nello stesso modo si liquefanno il gas ammonico e l'anidride solforosa. Le tre sostanze nominate vengono su larga scala preparate liquide in bombole e usate per diverse applicazioni, come si dirà più innanzi.

111. Liquefazione dei gas difficilmente liquefacibili - Metodi per ottenere le basse temperature. — I gas difficilmente liquefacibili sono quelli, come s'è detto, che hanno temperature critiche assai basse; ma il procedimento per liquefarli, in sostanza, non differisce da quello già studiato. Soltanto che in questo caso occorre prima di tutto disporre di mezzi particolari per ottenere delle temperature convenientemente basse.

È opportuno quindi che diciamo poche cose in proposito.

I mezzi che consentono di ottenere delle basse temperature si possono ridurre ai tre seguenti:

1° Le miscele frigorifere.

2° L'evaporazione rapida di un liquido volatile.

3° L'espansione di un gas compresso.

Le miscele frigorifere non hanno che modeste applicazioni, perchè dànno deboli abbassamenti di temperatura.

L'evaporazione di un liquido si compie a spese di una certa quantità di calore che la sostanza toglie a sè stessa e ai corpi in contatto.

Per cominciare da fatti ben noti, si sa che anche agitando nell'aria una mano bagnata d'acqua si ha una discreta sensazione di freddo.

Gli *alcarazaz* (fig. 258) sono recipienti in terracotta, non verniciata e abbastanza porosa. Riempiti d'acqua, questa

Fig. 258.

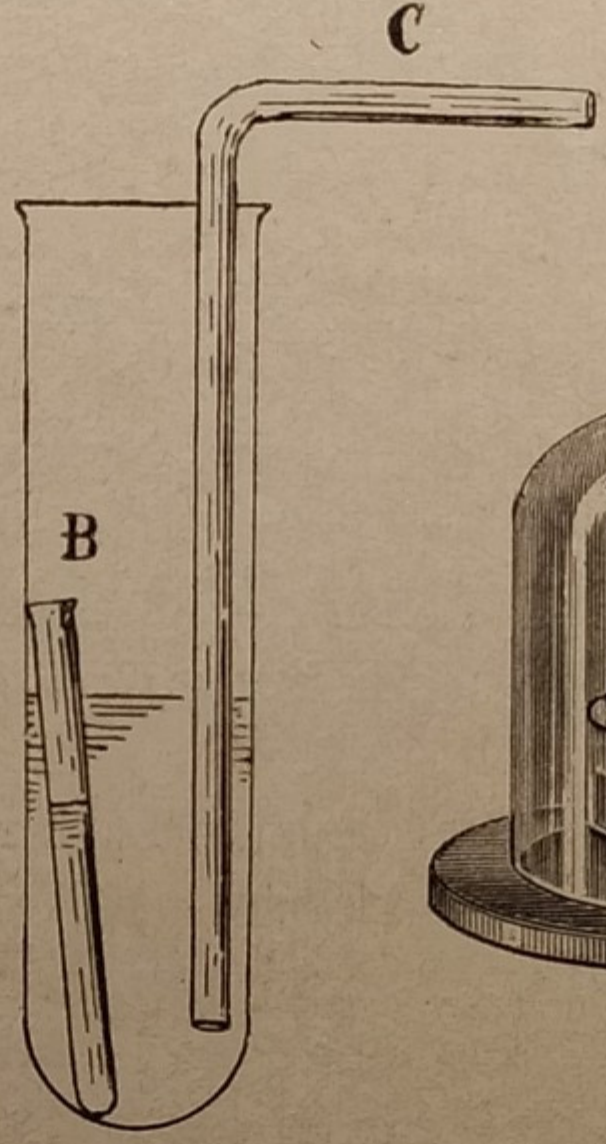

Fig. 259.

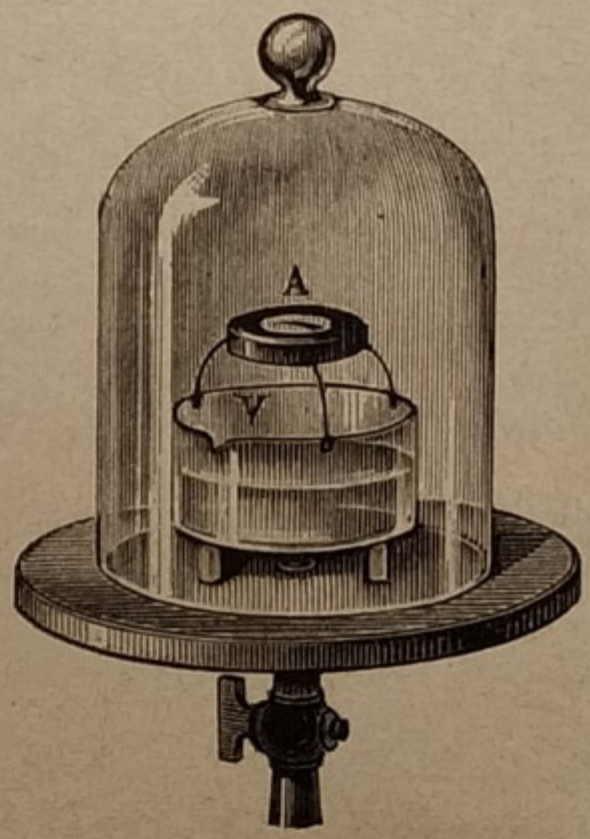

Fig. 260.

trasuda e mantiene costantemente umida la superficie esterna, dimodochè l'evaporazione mantiene fresca l'acqua interna.

In una provetta *A* (fig. 259) si pone qualche po' d'etere solforico, nel quale pesca una provetta più piccola *B* contenente dell'acqua.

Mediante un cannello *C* si fa gorgogliare attraverso l'etere una forte corrente d'aria, che ne determina la rapida evaporazione; dopo un po' di tempo nella provetta *B* si trova l'acqua gelata.

Sotto una campana pneumatica si pone una vaschetta di vetro *V* (fig. 260) contenente dell'acido solforico concentrato, e sopra questa, sostenendovela con un telaio metallico, una

capsula *A*, fatta di sostanza cattiva conduttrice, scavandola, ad esempio, in un pezzo di sughero, nella quale si pone un po' d'acqua. Messa in azione la macchina pneumatica, l'acqua evapora rapidamente per effetto della bassa pressione e perchè i vapori vengono, man mano che si formano, assorbiti dall'acido solforico. Dopo pochi minuti l'acqua entra in ebollizione per effetto della bassa pressione e gela per il raffreddamento prodotto dalla rapida evaporazione.

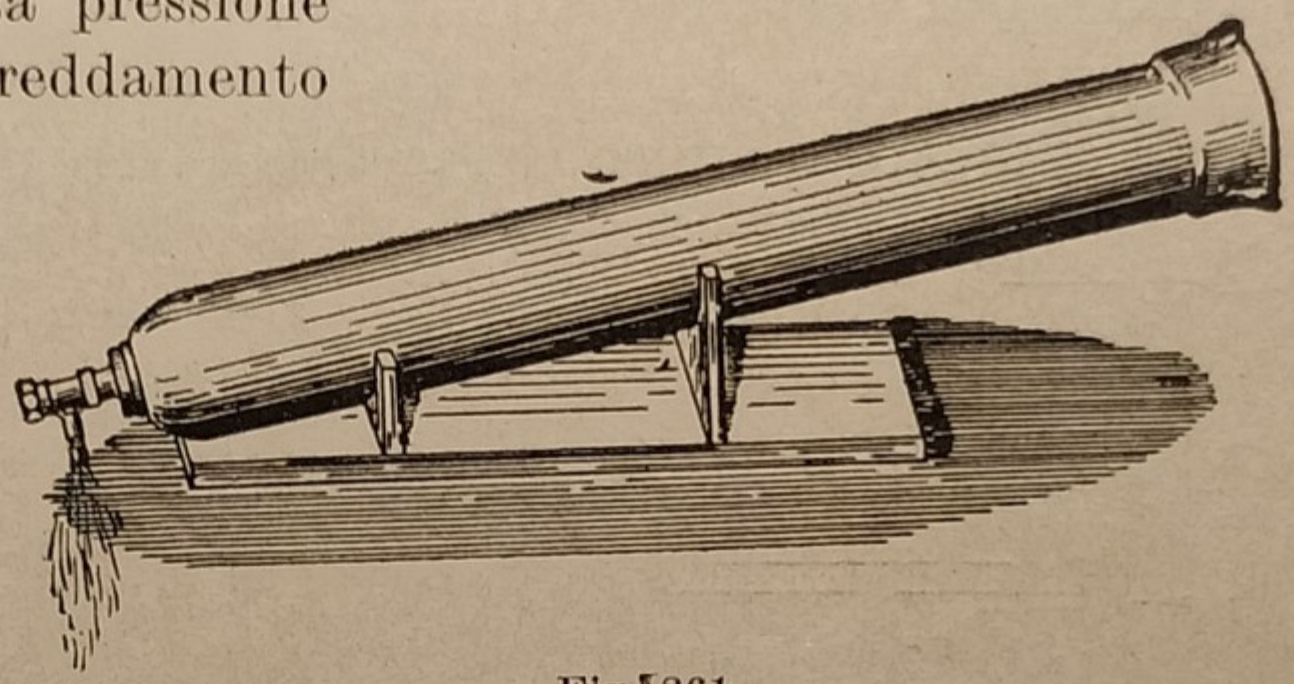

Fig. 261.

Ma la sostanza che, almeno per dimostrazioni scolastiche, serve ad ottenere con grande facilità delle temperature discretamente basse, è l'anidride carbonica liquefatta in bombole come già si disse. La bombola (fig. 261) si dispone inclinata sul tavolo di guisa che l'orifizio d'uscita della sostanza sia coperto dal liquido. Se si apre il robinetto si vede uscire un getto rumoroso e fumante che svanisce subito nell'aria. Avviene che in seguito al brusco salto di pressione da qualche decina di atmosfere a una atmosfera, il liquido non appena si affaccia all'orifizio evapora istantaneamente, producendo un notevole raffreddamento, sì che una parte della sostanza passa allo stato solido; il getto bianco che vediamo uscire dalla bombola è infatti un getto gassoso che tiene in sospensione innumerevoli fiocchetti di anidride carbonica *solida*. Per raccogliere la sostanza si dirige il getto dentro una scatola di legno fatta di due parti, rientranti l'una nell'altra (fig. 262), sì che il getto en-

Fig. 262.

trando per *A*, si frange dentro la scatola contro una lamina *C* che fa come da schermo al canale opposto *B*. La sostanza solida si raccoglie in gran parte nella scatola, e il gas, passando dietro lo schermo *C*, esce da *B*.

Così, dopo pochi secondi, smontata la scatola, la si trova piena di una bella sostanza candida come la neve, che si dice appunto *neve carbonica*.

Tale neve, versata sul tavolo, la si vede lentamente sparire, perchè sublima a spese del calore dell'ambiente e proprio, mantenendosi ad una temperatura di circa $-60°$; e in breve tempo si vede la massa bianca ricoperta di uno strato di brina, dovuta alla solidificazione del vapor d'acqua atmosferico.

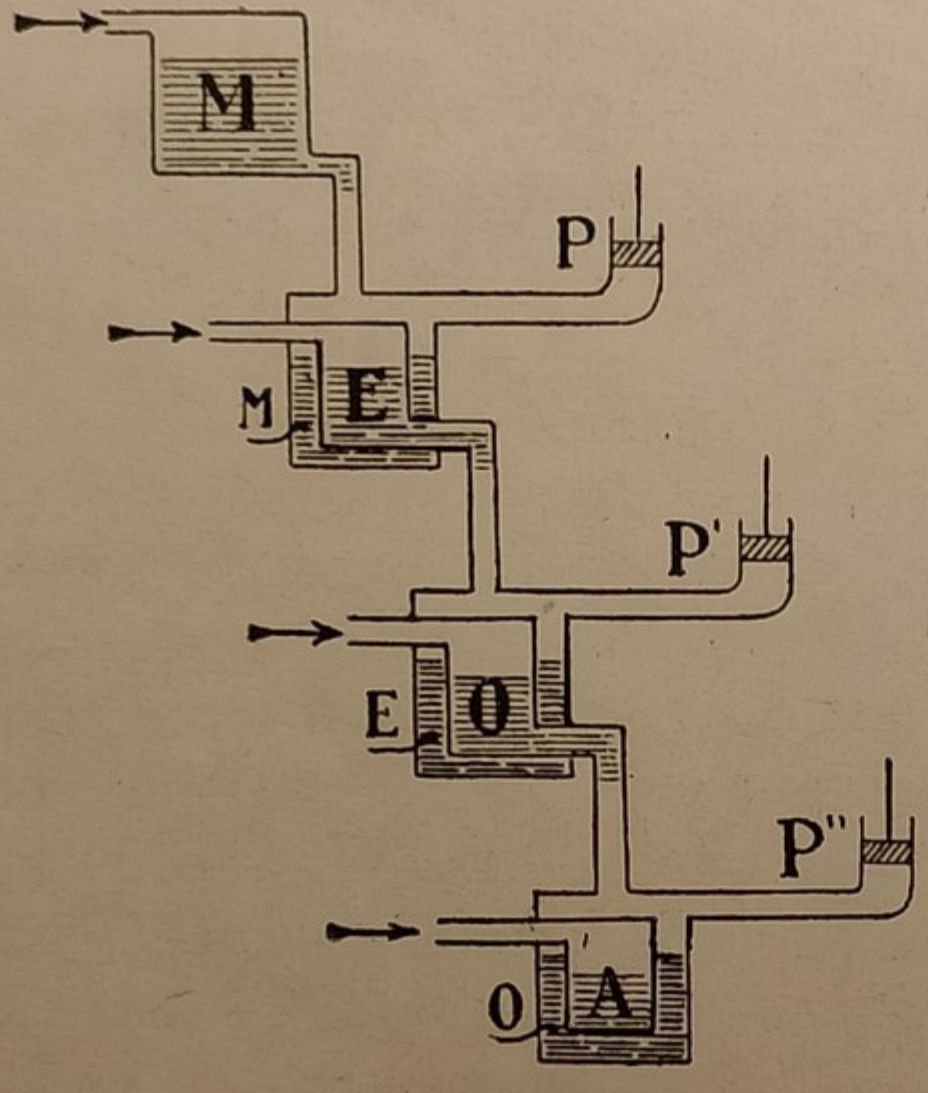

Fig. 263.

Se si mescola la neve carbonica con etere, si ha un miscuglio frigorifero, detto *pasta di Thilorier*, la cui temperatura può raggiungere da $-80°$ a $-90°$.

A tali temperature è possibile mostrare in lezione con grande facilità fenomeni di congelazione assai interessanti.

Volendo ottenere più forti abbassamenti di temperatura si può usare la disposizione *a cascata* di Kammerling Onnes dell'Università di Leyda (fig. 263).

In un recipiente *M* si mette del cloruro di metile liquido che si fa evaporare nel vuoto mediante una pompa *P*, e i suoi vapori si fanno circolare attorno ad un recipiente *E* dove arriva dell'etilene che così raggiunge la temperatura di $-70°$. L'etilene gassoso, raffreddato dai vapori di cloruro di metile, è compresso e liquefatto. In seguito questo etilene liquido lo si fa evaporare mediante la pompa P^1 e circolare attorno ad un recipiente *O* nel quale arriva dell'ossigeno. Alla tempe-

ratura di $-150°$, raggiunta dai vapori di etilene, l'ossigeno viene liquefatto, come è avvenuto per i gas precedenti, e così susseguentemente si liquefa l'azoto, che si fa entrare nel recipiente *A*, ecc.

Con un processo di tal genere il citato Kammerling Onnes, nel grande Laboratorio per le basse temperature di Leyda, il 10 luglio 1908 riuscì a liquefare l'*elio* a una temperatura vicina a $-270°$, l'unico gas che fino allora aveva resistito agli sforzi dei Fisici.

112. Liquefazione dell'aria. — L'aria viene oggi industrialmente liquefatta mettendo in opera il 3° procedimento citato nel paragrafo precedente, cioè il freddo derivante dalla brusca espansione di un gas.

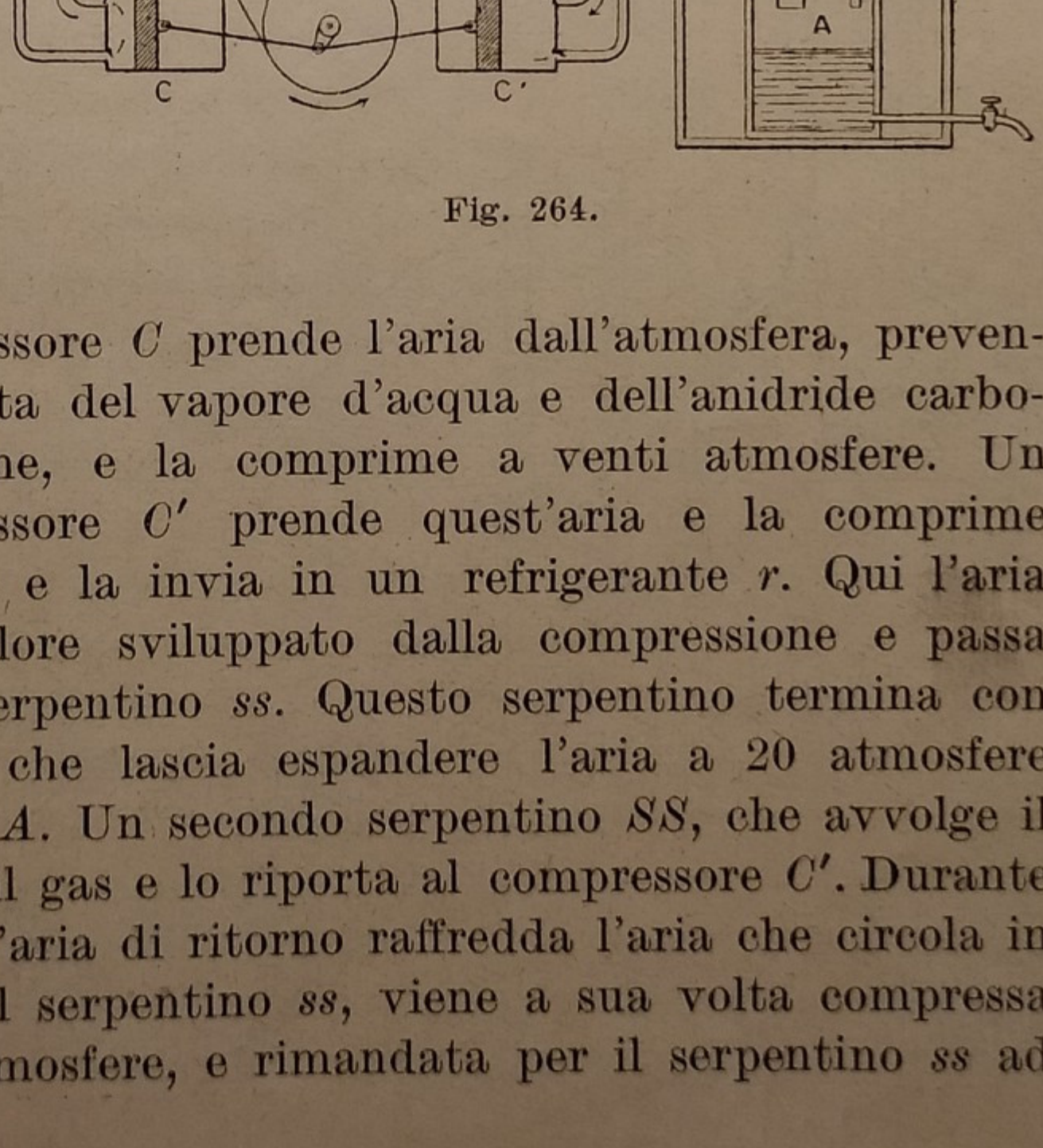

Fig. 264.

Si usa di solito la macchina Linde, di cui la fig. 264 rappresenta uno schema.

Un primo compressore *C* prende l'aria dall'atmosfera, preventivamente purgata del vapore d'acqua e dell'anidride carbonica che contiene, e la comprime a venti atmosfere. Un secondo compressore *C'* prende quest'aria e la comprime a 220 atmosfere e la invia in un refrigerante *r*. Qui l'aria abbandona il calore sviluppato dalla compressione e passa ad un tubo a serpentino *ss*. Questo serpentino termina con un robinetto *R* che lascia espandere l'aria a 20 atmosfere in un recipiente *A*. Un secondo serpentino *SS*, che avvolge il primo, riprende il gas e lo riporta al compressore *C'*. Durante questo tragitto l'aria di ritorno raffredda l'aria che circola in senso inverso nel serpentino *ss*, viene a sua volta compressa ancora a 220 atmosfere, e rimandata per il serpentino *ss* ad

espandersi di nuovo in A, e così di seguito. Con tal processo l'aria si espande in A a temperature via via più basse, finchè vi raggiunge la temperatura di liquefazione. A partire da questo momento il calore assorbito nell'espansione non può più tradursi in un abbassamento di temperatura, ma produce la liquefazione di una parte dell'aria, che si raccoglie liquida in fondo al recipiente A, dal quale si può togliere mediante un secondo robinetto.

Tutto il sistema dei tubi a serpentino e il recipiente A sono avvolti da un grosso strato di lana naturale non sgrassata, che impedisce al sistema di ricevere calore dall'esterno (93).

113. Conservazione dell'aria liquida: vasi di Dewar. — Non si può pensare di chiudere l'aria liquida in un recipiente completamente chiuso, perchè, prima di tutto si riscalderebbe, e dal momento in cui arrivasse alla temperatura critica, che è $-140°$, si trasformerebbe totalmente in gas. D'altra parte, siccome 1 litro d'aria liquida deriva dalla liquefazione di circa 1 metro cubo di aria gasosa nelle condizioni normali, l'aria gasosa assumendo la temperatura ordinaria, eserciterebbe nel volume che occupava allo stato liquido, una pressione di circa 1000 atmosfere, ciò che sarebbe assai pericoloso.

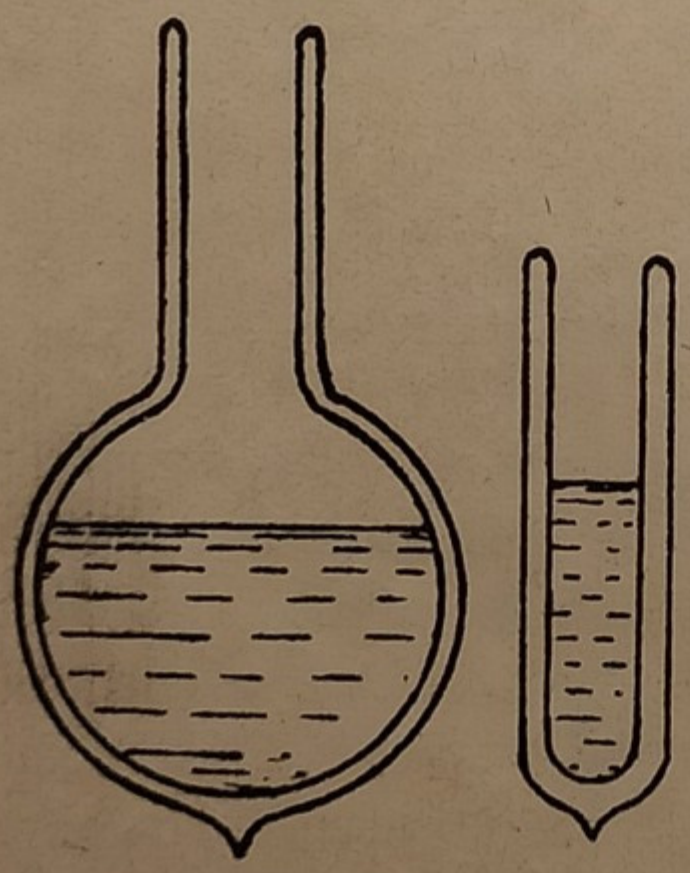

Fig. 265.

In vaso aperto, al contrario, l'aria liquida evaporando raggiunge spontaneamente la temperatura alla quale la tensione del suo vapor saturo è di 1 atmosfera, cicè a dire assume la temperatura di ebollizione alla pressione di 1 atmosfera, che è di $-194°$ circa. La conservazione dell'aria liquida in queste condizioni è stata resa pratica mediante l'uso di speciali recipienti in vetro o sferici o cilindrici (fig. 265) a doppia parete; nello spazio fra le due pareti è praticato il vuoto più spinto che è possibile. Questi recipienti furono immaginati nel 1887 da D'Arsonval; più tardi il Dewar ebbe l'idea di argentare inte-

riormente la doppia parete; in tal modo è quasi interamente soppresso lo scambio di calore coll'esterno, sia per conduttività, sia per irradiazione o per convezione.

Il vuoto riduce a $\frac{1}{15}$ la velocità di evaporazione che si avrebbe per un vaso comune a parete semplice; nella stessa misura la velocità di evaporazione viene ridotta per effetto dell'argentatura: in totalità l'impiego simultaneo dei due procedimenti riduce a circa $\frac{1}{15} \times \frac{1}{15} = \frac{1}{225}$ la velocità di evaporazione.

In tali condizioni, la perdita d'aria che evapora per effetto del calore ricevuto dall'esterno, alla temperatura di —194°, in un vaso di Dewar cilindrico, di circa 1 litro di capacità, può essere ridotta a 20 grammi d'aria liquida all'ora.

Bottiglie e recipienti di varie forme, sul tipo dei vasi di Dewar, si trovano oggi anche in commercio, sotto il nome di « Thermos » o simile; e servono ai viaggiatori e agli alpinisti per *conservare sia il caldo sia il freddo*, come si desidera. Una bibita bollente messa in un Thermos si conserva per 24 ore quasi alla stessa temperatura.

114. Proprietà e applicazioni dell'aria liquida. — L'aria liquida è un liquido trasparente, azzurrognolo; ha una densità variabile da 0,93 a 1,12. Questa variazione dipende dal fatto che l'aria liquida è principalmente una miscela di azoto e di ossigeno liquidi; l'azoto, bollendo a temperatura più bassa dell'ossigeno, evapora più rapidamente di questo, e siccome è più leggero, l'aria liquida va aumentando gradatamente di densità a mano a mano che l'azoto vien meno.

Perciò l'aria liquida viene utilizzata per la preparazione dell'ossigeno e dell'azoto, separandoli l'un dall'altro.

L'ossigeno così preparato — ossigeno atmosferico — allo stato di gas, compresso in bombole, come quelle usate per l'anidride carbonica, viene utilizzato per alimentare la fiamma ossi-acetilenica, usata largamente per la saldatura autogena e per il taglio di lastre di ferro anche assai spesse; per ottenere alte temperature nei forni metallurgici e per preparare l'ani-

dride solforica col metodo di contatto. L'ossigeno viene ancora usato in medicina.

L'azoto è adoperato per avere la cianamide calcica e per la preparazione dell'acido nitrico.

L'aria liquida è largamente usata nei laboratori per ottenere con facilità delle temperature assai basse, alle quali avvengono numerosi e interessanti fenomeni. A —194° le lastre fotografiche non sono più impressionate dalla luce, il solfuro di calcio cessa d'essere fosforescente; lo diventa invece la paraffina.

Immersi nell'aria liquida, il caoutchouc, la carne, le uova diventano duri e fragili come il vetro; il piombo diventa elastico e sonoro.

115. Calore di trasformazione. — È chiamato con questo nome il calore impegnato nei vari cambiamenti di stato, alcuni dei quali — fusione ed evaporazione — si compiono con assorbimento di calore; altri, come la solidificazione e la liquefazione, con emissione di calore da parte della sostanza.

Per darci ragione del fatto devesi tener presente che le molecole dei corpi sono legate da una mutua coesione, e che sono continuamente in moto. Si ritiene che il calore sia una energia cinetica molecolare e che la temperatura consista nella velocità media delle molecole.

Comunicare del calore a un corpo significa metterlo a contatto di un altro a maggiore temperatura, cioè avente molecole animate da una velocità media superiore. Avviene allora che per effetto degli urti ricevuti le molecole del primo acquistano un aumento di velocità: *il corpo si riscalda*. Può però avvenire che il calore ricevuto venga impegnato tutto o in parte ad eseguire uno spostamento o un nuovo assetto delle molecole in opposizione alla loro mutua coesione: si ha così una trasformazione di energia da cinetica a potenziale. Questo avviene nella fusione e nella evaporazione, dove il corpo richiede del calore non destinato a riscaldarlo. Nei passaggi inversi — solidificazione e liquefazione — le molecole riassumono il primitivo assetto, l'energia potenziale si converte in cinetica e il corpo abbandona del calore.

116. Calore di fusione e di vaporizzazione. — È detto *calore di fusione* di una sostanza il numero di piccole calorie occorrenti per fondere, senza cambiamento di temperatura, 1 grammo-massa della detta sostanza. Riportiamone alcuni valori:

Acqua a 0°	79,7
Alluminio	80
Argento	25
Ferro	59
Mercurio	2,77

L'elevato calore di fusione del ghiaccio non è senza importanza nell'economia della natura; infatti le grandi masse di neve che si accumulano d'inverno sulle montagne, fondono lentamente per effetto del calore primaverile ed estivo e in tal modo abbiamo i fiumi che dànno acque in modo continuo e sorgenti perenni. Se il calore di fusione del ghiaccio fosse molto basso, ai primi calori della buona stagione le riserve d'acqua delle montagne si esaurirebbero rapidamente, dando luogo a violenti inondazioni, seguite da un periodo di disseccamento dei fiumi e delle sorgenti.

Si chiama *calore di vaporizzazione* di un liquido *ad una data temperatura t°, il numero di piccole calorie assorbite da 1 grammo del liquido a t°, per passare dallo stato di vapore saturo alla stessa temperatura.*

Così l'etere a 0° ha un calore di vaporizzazione 94; a 20°, 91,3.

L'acqua a 0° ha un calore di vaporizzazione 596,8; a 40°, 574; a 80°, 551; a 100°, 538,4; a 140°, 510,9; a 170°, 489,4.

Da questi dati si scorge che *il calore di vaporizzazione di un liquido diminuisce col crescere della temperatura.*

Si deve al Régnault la seguente formola empirica per determinare il calore di vaporizzazione C_v dell'acqua a una temperatura qualsiasi t compresa tra 100° e 195°.

$$C_v = 606{,}5 - 0{,}695\, t.$$

Per $t = 100°$, si avrebbe:

$$C_v = 537.$$

Notisi che in seguito a misure più recenti, tale numero è risultato qualche poco differente, com'è riportato poco sopra.

Il grande calore di vaporizzazione dell'acqua concorre col grande calore specifico di questa sostanza a rendere più mite il clima delle spiagge.

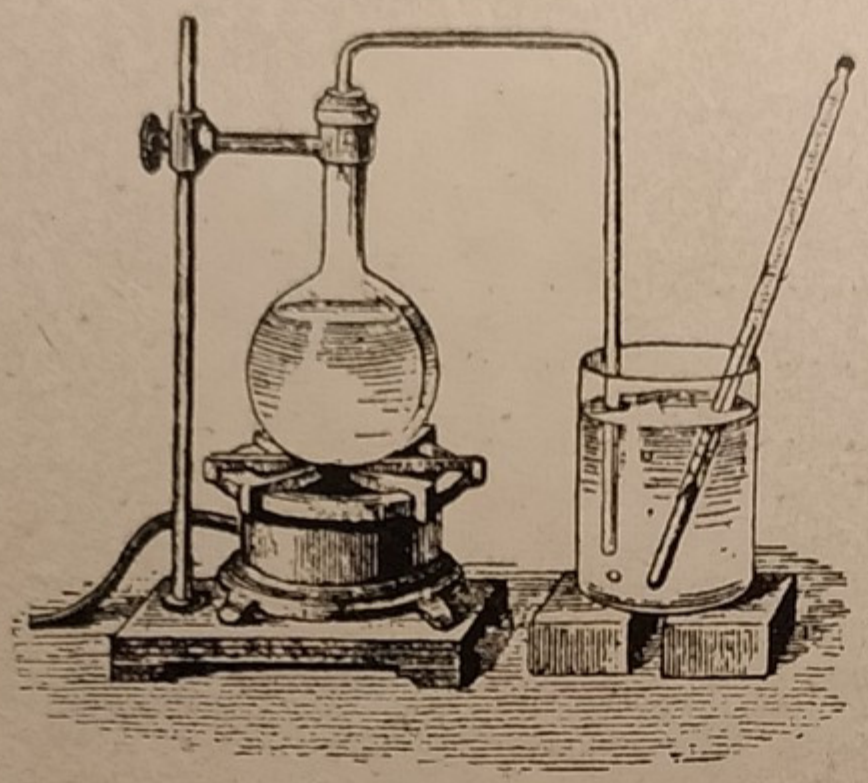

Fig. 266.

Nelle industrie viene utilizzato in tanti casi; un'applicazione importante l'abbiamo nei *caloriferi a vapore.*

In molti stabilimenti il riscaldamento a vapore è largamente usato. Per darne un'idea facciamo la seguente esperienza: in un palloncino di vetro si fa bollire dell'acqua e il vapore che si forma, mediante un tubo di vetro opportunamente ricurvo, facciamolo arrivare fino al fondo di un bicchiere contenente dell'acqua fredda, in cui è immerso un termometro (fig. 266). Si osserva che l'acqua del bicchiere si riscalda rapidamente per effetto del calore di vaporizzazione abbandonatovi dal vapore che vi si condensa.

Igrometria.

117. Umidità dell'aria. — L'aria contiene sempre del vapor d'acqua. Esso proviene dall'evaporazione degli oceani e dei mari, la cui superficie è circa quadrupla di quella delle terre emerse. Sorgente secondaria è l'evaporazione dai laghi, dai fiumi, dal suolo umido, dagli organismi, specialmente dalle piante.

Occorre notare che l'evaporazione si compie a tutte le temperature e avviene dall'acqua sia allo stato liquido, sia allo stato solido: neve e ghiaccio.

L'evaporazione è minore nei laghi alpini che non in quelli pedemontani, e cresce col diminuire della latitudine; così la evaporazione media annua nel lago di Costanza è di 80 cm., nel lago di Garda 120 cm., nel Trasimeno 130^{cm}.

In determinate condizioni il vapor d'acqua atmosferico *precipita*, ossia si trasforma in acqua liquida o in ghiaccio.

Agli scopi meteorologici è importantissimo lo studio del vapor d'acqua contenuto nell'aria, o, per dir meglio, la determinazione dell'*umidità atmosferica*. E qui occorre subito precisare il significato di umidità: l'aria è più o meno umida non solo in relazione alla massa assoluta M di vapore contenuto in un metro cubo d'aria, ma anche in relazione alla temperatura alla quale l'aria si trova. Dimodochè, se m è la massa di vapor d'acqua contenuta in un dato istante in un metro cubo d'aria ed M è la massa di vapore che alla stessa temperatura renderebbe saturo lo stesso volume d'aria, l'aria è tanto più umida quanto più m si avvicina ad M, sì che una leggera diminuzione di temperatura potrebbe provocare la saturazione.

Stato igrometrico dell'aria è detto il rapporto tra m ed M ed *umidità relativa* dell'aria il prodotto dello stato igrometrico per 100. Se quindi l'aria fosse assolutamente umida lo stato igrometrico $\frac{m}{M}$ sarebbe eguale ad 1, e l'umidità relativa eguale a 100; in caso di aria completamente secca sarebbe $\frac{m}{M} = 0$ e l'umidità relativa pure zero.

A questo punto giova sapere che dai Fisici è stata dimostrata la seguente formola:

$$m = \frac{V}{1+\frac{t}{273}} \times \frac{f}{76} \times 0{,}001293 \times 0{,}622$$

la quale mette in relazione la massa m di vapor d'acqua contenuta alla temperatura t in volume V d'aria, colla tensione f che il vapore da parte sua esercita nell'aria.

Perciò, se M è la massa di vapore che alla temperatura stessa t rende saturo il volume V d'aria, esso eserciterà nell'aria la sua tensione massima F corrispondente alla temperatura t, e potremo quindi scrivere:

$$M = \frac{V}{1+\frac{t}{273}} \times \frac{F}{76} \times 0{,}001293 \times 0{,}622.$$

Le due equazioni, divise l'una per l'altra, danno:

$$\frac{m}{M} = \frac{f}{F} \ ;$$

vale a dire lo stato igrometico definito da $\frac{m}{M}$, equivale anche al rapporto fra la tensione attuale del vapor d'acqua nell'aria e la sua tensione massima F alla stessa temperatura. Il valore di F viene dato dalla nota tavola del § 103, quello di f è fornito dagli *igrometri*.

118. Igrometro chimico. — In questo tipo di apparecchio si fa passare un noto volume d'aria attraverso parecchi tubi ad **U** contenenti delle sostanze capaci di assorbire il vapor d'acqua, ad esempio, del cloruro di calcio fuso. I tubi si pesano prima e dopo l'esperienza, e l'aumento di peso misura la massa di vapore contenuto nel noto volume d'aria.

119. Igrometri a condensazione. — Questi igrometri dànno senz'altro la misura di f. Il loro principio è il seguente: se si prende anche un comune bicchiere contenente acqua e la si raffredda lentamente coll'introduzione di qualche pezzetto di ghiaccio, lo strato d'aria immediatamente a contatto col bicchiere si raffredda fino a una temperatura t' alla quale il vapore che essa contiene diventa saturo. In tali condizioni anche un piccolo abbassamento di temperatura al di sotto di t' provoca la condensazione del vapore, che si deposita sotto forma di un velo di rugiada, appannando il bicchiere. La temperatura t' alla quale avviene il fenomeno, si dice temperatura o *punto di rugiada*. In tal fenomeno l'aria aderente al bicchiere si è raffreddata senza cambiamento della tensione del vapore in essa contenuto, cosicchè la tensione massima a t' è eguale alla tensione effettiva f che il vapor d'acqua possiede nell'aria a t^o. Da ciò è chiaro che, noto t', f è senz'altro dato dalla tavola citata (103).

Tra i diversi tipi di igrometri a condensazione, accenneremo a quello di Alluard (fig. 267). Una scatoletta prismatica metallica ha la faccia anteriore A o d'argento, o di altro metallo argentato o dorato, lucidata a specchio, ed è circondata da una lamina B

parimenti speculare, che sta nello stesso piano di A senza toccarla. Nella scatola si pone dell'etere o dell'alcool con un termometro T, e con un giuoco di tubi si fa lentamente gorgogliare dell'aria attraverso il liquido. In tal modo la parete A si raffredda e arriva un momento in cui la superficie A si appanna e si può, esaminando per contrasto con la superficie B che resta inalterata, apprezzare bene l'istante in cui su A si deposita il primo velo di rugiada. Basta allora leggere la temperatura t' segnata dal termometro interno T e quella t segnata dal termometro esterno I che dà la temperatura dell'aria ambiente. Si cercano nella tavola sopra citata le tensioni massime f ed F corrispondenti alle temperature t' e t e il loro rapporto misura, come si è spiegato, lo stato igrometrico cercato.

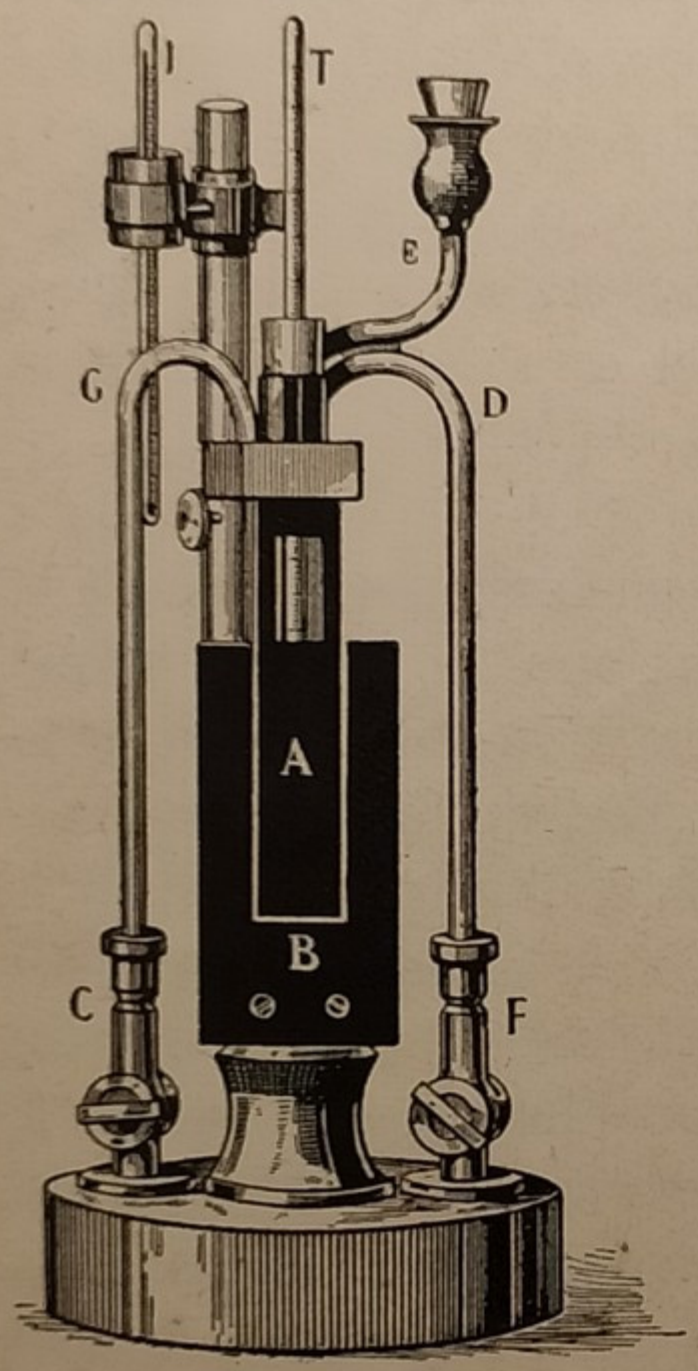

Fig. 267.

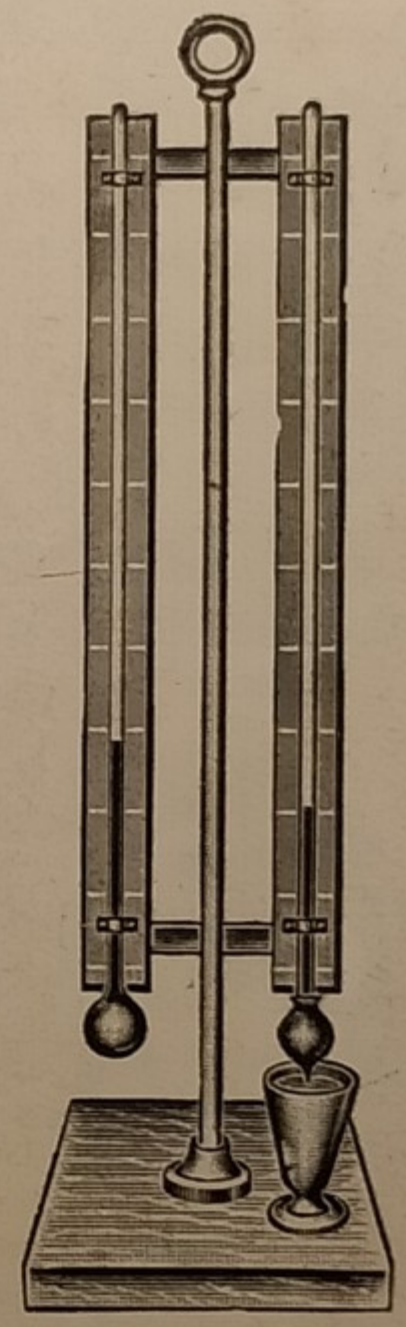
Fig. 268.

120. Psicrometro. — Nei nostri Osservatorî Meteorici l'umidità dell'aria vien determinata speditamente col *psicrometro* (fig. 268), che è formato di due termometri identici sospesi vicini, divisi in decimi o almeno in quinti di grado, uno dei quali ha il bulbo coperto con una pezzuola di mussola che viene bagnata con acqua distillata. In tal modo l'evaporazione dell'acqua che imbeve la pezzuola determina un abbassamento di temperatura del termometro *bagnato*, il quale d'altra parte riceve calore dall'ambiente. Così avviene che ad un certo momento il calore sottratto dall'evaporazione è esattamente com-

pensato da quello che il termometro riceve dall'ambiente, e il termometro assumerà una temperatura di regime t', che, come si intuisce, sarà tanto più bassa della temperatura t dell'ambiente, segnata dal termometro *asciutto*, quanto più attiva risulterà l'evaporazione dell'acqua dalla pezzuola, ossia quanto minore sarà l'umidità dell'aria.

Una formola, che non esponiamo, serve a calcolare la tensione f che ha il vapore nell'aria, in funzione della tensione massima F alla temperatura dell'ambiente, della pressione atmosferica e delle temperature t' e t del termometro bagnato ed asciutto. Ma con maggior speditezza si ottiene l'umidità cercata ricorrendo ad apposite tavole, per l'uso delle quali basta conoscere la differenza $t - t'$ dei due termometri, e la temperatura t' del termometro bagnato.

121. Igroscopî. — S'incontrano spessissimo anche fuori dei laboratori, degli strumenti che non possono aspirar all'ufficio di veri e propri igrometri, perchè dànno solo e con frequenti incertezze, un'idea della maggiore o minore umidità dell'aria.

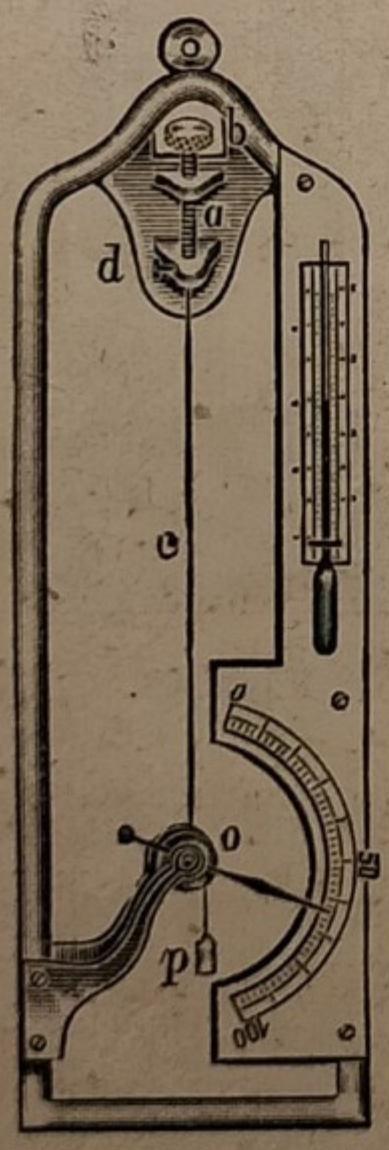

Fig. 269.

L'*igroscopio a capello* di Saussure (fig. 269) è costituito di un telaio di legno o di metallo nel quale è teso un capello preventivamente digrassato, fisso ad un estremo, in d, e di cui l'altro estremo si avvolge sopra una piccola puleggia O, solidale con un indice. Il capello all'estremo inferiore è caricato di un piccolo peso P. Nell'aria umida il capello si allunga, con che l'indice si muove su di un arco di cerchio in un certo senso; il contrario avviene con l'aria secca. L'arco è diviso in 100 parti eguali, segnando 0 e 100 rispettivamente nelle posizioni occupate dall'indice, dopo che lo strumento è stato lasciato per lungo tempo entro un recipiente con calce viva e poi in un altro con le pareti mantenute costantemente bagnate; le indicazioni dell'apparecchio sono soggette a diverse cause di errore.

Talora s'incontrano degli igroscopî fatti con una figurina di cartone che presenta qualche movimento al variare dell'umidità, per esempio, un frate il cui cappuccio s'innalza quando l'aria diventa umida, ecc. In tali casi si usa un pezzetto di corda da violino di minugia con un estremo fisso e coll'altro unito alla parte mobile della figura, nel caso citato al cappuccio del frate. In tal modo il cappuccio assume un movimento in un senso o nell'altro per la proprietà che hanno le corde di minugia di svolgersi o di avvolgersi su se stesse secondo che l'umidità dell'aria aumenta o diminuisce.

Cenni di Termodinamica.

122. Trasformazione reciproca del lavoro e del calore; 1° principio della Termodinamica. — L'energia meccanica può talvolta sparire in seguito agli attriti e alla imperfetta elasticità dei corpi; in tali casi all'energia meccanica venuta meno corrisponde la produzione di una certa quantità di calore.

L'americano Rumford, trovandosi nel 1798 a Monaco di Baviera per dirigere la costruzione di alcuni cannoni, restò veramente impressionato della quantità enorme di calore che si sviluppava durante la perforazione. In una memoria pubblicata verso quell'epoca, il Rumford espone chiaramente l'idea che il lavoro meccanico, impiegato a vincere l'attrito, si trasformava in calore.

Il Rumford modificò le sue esperienze, per togliere di mezzo alcune obbiezioni fattegli dagli Scienziati contemporanei, e riuscì, fra le altre, a far bollire, dentro una cassa di legno, $11^{kg},360$ d'acqua in due ore e mezza, col calore sviluppato da un cilindro metallico che sfregava sul fondo di una specie di mortaio di bronzo immerso nell'acqua. Il cilindro era mantenuto in moto da due cavalli.

I lavori di Mayer, Hirn, Joule, Helmoltz, Clausius ed altri compiuti nella prima metà del secolo passato, dai quali risulta anche che il calore può trasformarsi in lavoro meccanico, servirono a concretare le idee di Rumford, e fu così fondata la *Termodinamica*, una importantissima branca della Fisica

che ha portato a dei meravigliosi risultati anche nel campo industriale.

Il *I° principio* della Termodinamica, detto anche *principio dell'equivalenza o di Mayer*, afferma che *nella trasformazione del lavoro meccanico in calore ad una determinata quantità di lavoro impiegato corrisponde sempre una determinata quantità di calore prodotto, e inversamente.*

A proposito di queste trasformazioni citeremo dei fatti comuni. Un pezzo di ferro battuto violentemente si riscalda

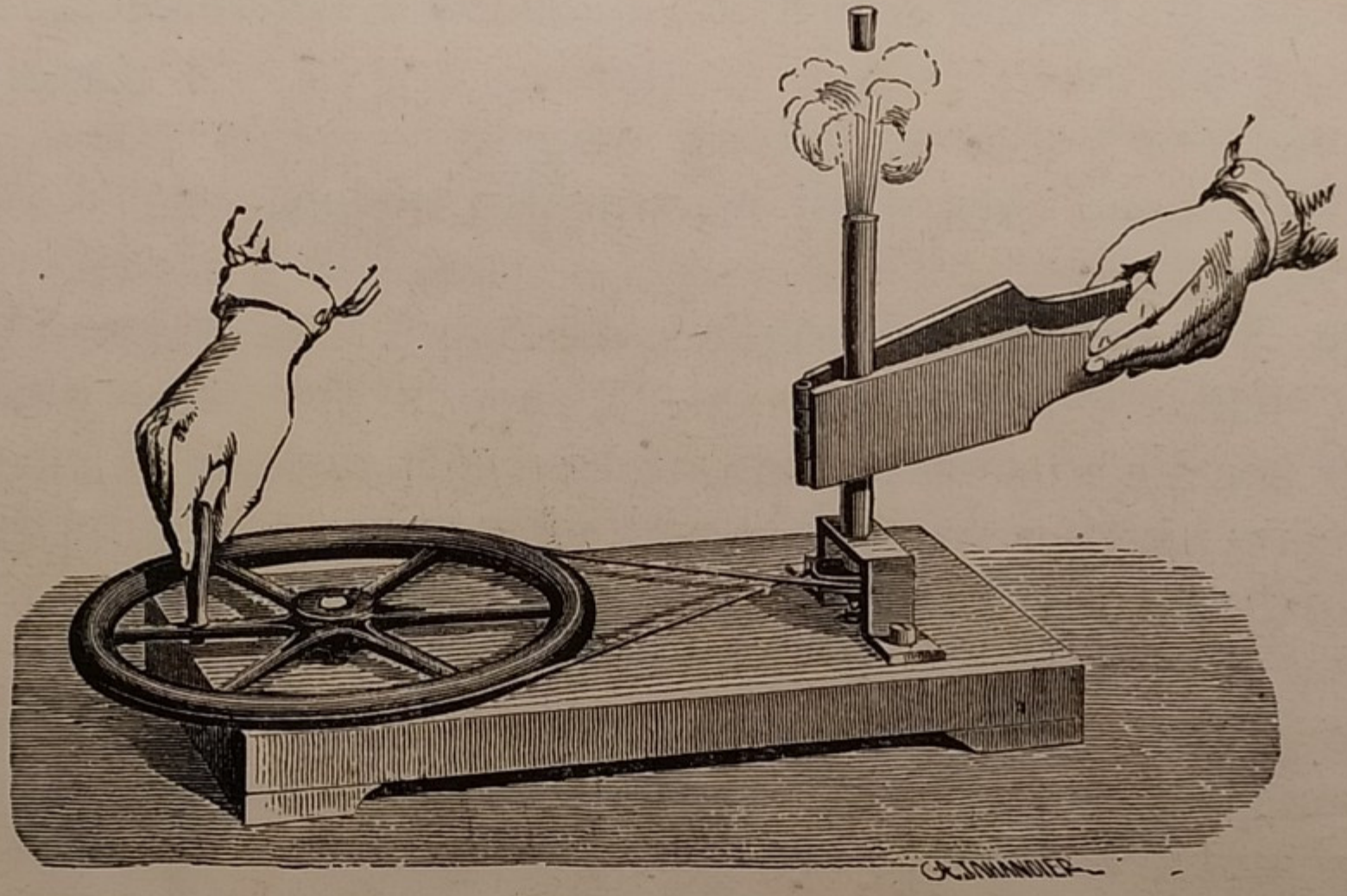

Fig. 270.

e può diventare rovente; una palla di piombo lanciata da un'arma da fuoco contro un muro resistente, può scaldarsi al punto da entrare in fusione.

Si sa che un succhiello che fora il legno, una sega in azione, un freno serrato contro una ruota d'una vettura, si riscaldano. Due pezzi di legno strofinati l'uno contro l'altro si carbonizzano e possono anche infiammarsi; così si accendono i fiammiferi strofinandoli; due pezzi di ghiaccio strofinati in un ambiente a 0°, entrano in fusione.

Come prova scolastica riferiamo l'esperienza di Tydall (fig. 270) nella quale si fa ruotare un tubo di ottone pieno di etere solforico, stringendolo moderatamente dentro una morsetta di legno. Il lavoro meccanico eseguito dal braccio dello

sperimentatore o da un motore, se si ricorre a questo mezzo per vincere l'attrito, si converte in calore, che fa aumentare la tensione del vapor d'etere al punto da far saltare a distanza il tappo che chiude il tubo.

L'*acciarino pneumatico*, lo stesso tubo di vetro munito di stantuffo che ci ha già servito per dimostrare la comprimibilità dell'aria (3), può ora servirci per dimostrare che il lavoro speso per operare una brusca compressione dell'aria, sviluppa visibilmente del calore. Basta infatti fissare sotto la base dello stantuffo del detto apparecchio un po' d'esca; premendo con un colpo violento della mano lo stantuffo, l'aria compressa si riscalda al punto di accendere l'esca.

Non diverso è il fenomeno delle stelle cadenti, che venendo verso la Terra con grande velocità urtano violentemente contro l'atmosfera e s'accendono.

123. Equivalente meccanico della caloria. — Numerose esperienze vennero eseguite dai Fisici per determinare il così detto *equivalente meccanico della caloria*, vale a dire il numero di chilogrammetri o di joule necessari per produrre una caloria.

Col metodo di Joule si trasforma il calore, mediante strofinio, il lavoro prodotto dalla caduta di un peso.

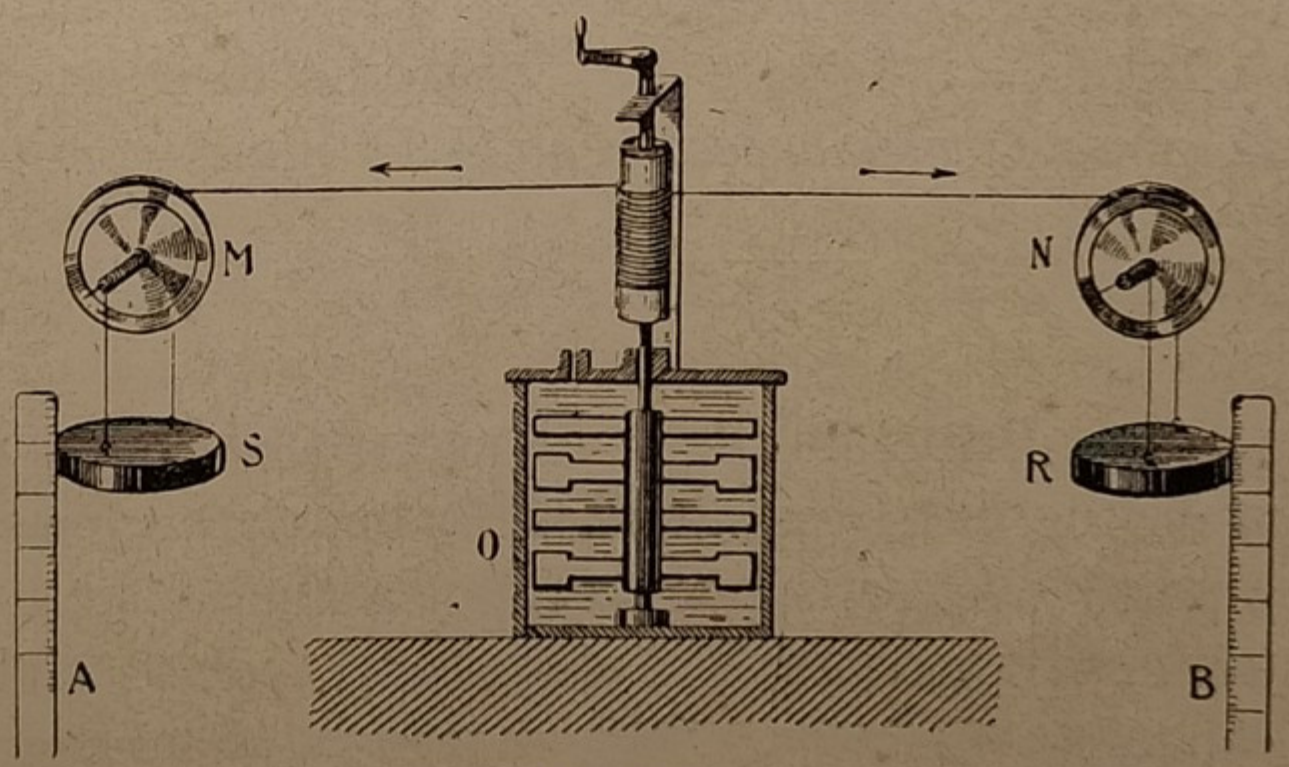

Fig. 271.

L'apparecchio (fig. 271) è formato di un calorimetro *O* ad acqua, dentro il quale è messo in moto un mulinello ad alette. Per aumentare l'attrito delle alette si impedisce la rotazione del liquido mediante setti fissati nel cilindro, secondo piani passanti per l'asse, nei quali son praticate delle aperture che consentono appena il passaggio delle alette. La rotazione del

mulinello è ottenuta per la discesa di due pesi eguali S e R, ed il moto è trasmesso all'albero del mulinello mediante due funicelle che passano sopra due carrucole M e N.

Il lavoro compiuto dai pesi in discesa è impegnato in parte a vincere le resistenze esterne al calorimetro, in parte a comunicare una certa forza viva alle masse S e R che scendono e arrivano alla fine della loro corsa con una certa velocità, e il resto infine serve per vincere l'attrito nell'interno del calorimetro.

Valutando con speciali criteri le prime due parti, e il lavoro totale compiuto dai pesi cadenti da un'altezza misurata, per differenza si trova la quantità di lavoro che si trasforma in calore nel calorimetro. Coi metodi poi esposti nella calorimetria si può misurare il numero di calorie raccolte nel calorimetro.

Il Joule variò le sue esperienze adoperando, invece dell'acqua, del mercurio, e dell'olio di balena, ma i risultati ottenuti presentarono una perfetta concordanza.

Esperienze posteriori portarono alle stesse conclusioni, solo che i numeri trovati riuscirono qualche poco diversi da quelli di Joule, sì che ora si ritiene che l'equivalente di una *grande* caloria in lavoro sia *427 chilogrammetri*. Ovvero, essendo 1 kgm. = 9,8 joule (30), potremo dire anche che a sviluppare *1 piccola caloria occorrono 4,18 joule*, o altrimenti che *1 joule può generare* $\frac{1}{4,18} = 0,24$ *piccole calorie*.

124. Principio della conservazione dell' energia. — All'infuori dei fatti esaminati nel precedente paragrafo, riscontriamo spesso che l'energia meccanica può visibilmente trasformarsi, come avviene di un corpo che cadendo da una certa altezza acquista della velocità, di modo che l'energia potenziale primitiva si trasforma in cinetica. Quando noi carichiamo il nostro orologio da tasca mediante uno sforzo muscolare, imprimiamo alla molla motrice dell'energia potenziale, che nelle 24 ore successive si converte lentamente in cinetica nel moto del bilanciere e delle ruote. Ma quando il corpo dopo l'urto contro il suolo è rimasto fermo o quando la molla è scarica, si ha, almeno in apparenza, una perdita di energia. Nessuna perdita però si verifica in realtà, perchè all'energia meccanica venuta

meno, corrisponde la produzione di una certa quantità di calore. Negli esempi citati il calore generato può sfuggire anche alle più accurate misure, ma le osservazioni e le esperienze citate nel paragrafo precedente mettono ben in chiaro la trasformabilità dell'energia meccanica in calore.

In altre numerose circostanze riscontriamo anche la trasformazione del calore in energia meccanica — nei motori termici —; dell'energia meccanica in energia elettrica e reciprocamente; dell'energia elettrica in calore, ecc. Insomma le diverse forme di energia possono sempre trasformarsi l'una nell'altra, ed eseguendo delle opportune misure, si è constatato che in qualunque trasformazione, ossia in qualunque fenomeno, che è sempre una trasformazione di energia, mai si verifica che la minima quantità di energia possa risultare distrutta o venire dal nulla. Questo enunciato costituisce in sostanza il famoso *principio della conservazione dell'energia*, tanto fecondo per il progresso scientifico.

125. 2° Principio della Termodinamica. — Il principio dell'equivalenza afferma che trasformando il lavoro in calore, ad ogni 427 kgm. si ha la produzione di una grande caloria. Anche il calore, come si è detto, può trasformarsi in lavoro, e in questo caso ad ogni caloria consumata corrisponde il lavoro di 427 kgm.

Ma qui è d'uopo considerare un fatto notevole: il lavoro si può sempre trasformare totalmente in calore, per es. mediante l'attrito, ma non è sempre possibile trasformare inversamente il calore in lavoro.

Esiste una limitazione in codesta trasformazione, limitazione che è dichiarata dal *2° principio della Termodinamica: non è possibile ideare un processo che abbia, come unica conseguenza finale, un passaggio di calore da un corpo freddo a un corpo caldo.*

E da tal principio deriva il seguente corollario: *non è possibile ideare un processo che abbia, come unica conseguenza, una trasformazione di calore in lavoro, assorbendo calore solo da un corpo che si trovi tutto alla stessa temperatura.*

Per conseguenza una macchina termica ha bisogno di poter avere scambio di calore con corpi a due temperature differenti. Così, ad es., nelle macchine a vapore tali due corpi sono rispettivamente la caldaia e il condensatore.

Quando la macchina funziona, essa prende dalla caldaia, ossia dal focolare, una certa quantità di calore Q, la quale non può venire trasformata integralmente in lavoro, perchè, se ciò fosse, l'unica conseguenza sarebbe la trasformazione del calore Q assorbito da una sorgente che si trova tutta alla stessa temperatura, in contraddizione col 2° principio della Termodinamica. Invece solo una parte q del calore Q assorbito dalla sorgente può venire trasformato in lavoro, mentre la parte rimanente $Q - q$ viene ceduta al condensatore.

126. Motori termici. — I *motori termici* trasformano industrialmente il calore in lavoro meccanico. Daremo un cenno: 1° delle *macchine a vapore*; 2° dei *motori a scoppio*.

127. Macchine a vapore. — Ogni macchina a vapore consta di tre parti: *caldaia*, *cilindro* e *condensatore* o *refrigerante*.

La *caldaia* è un recipiente che può resistere a pressioni più o meno elevate, ordinariamente da 5 a 20 o più atmosfere,

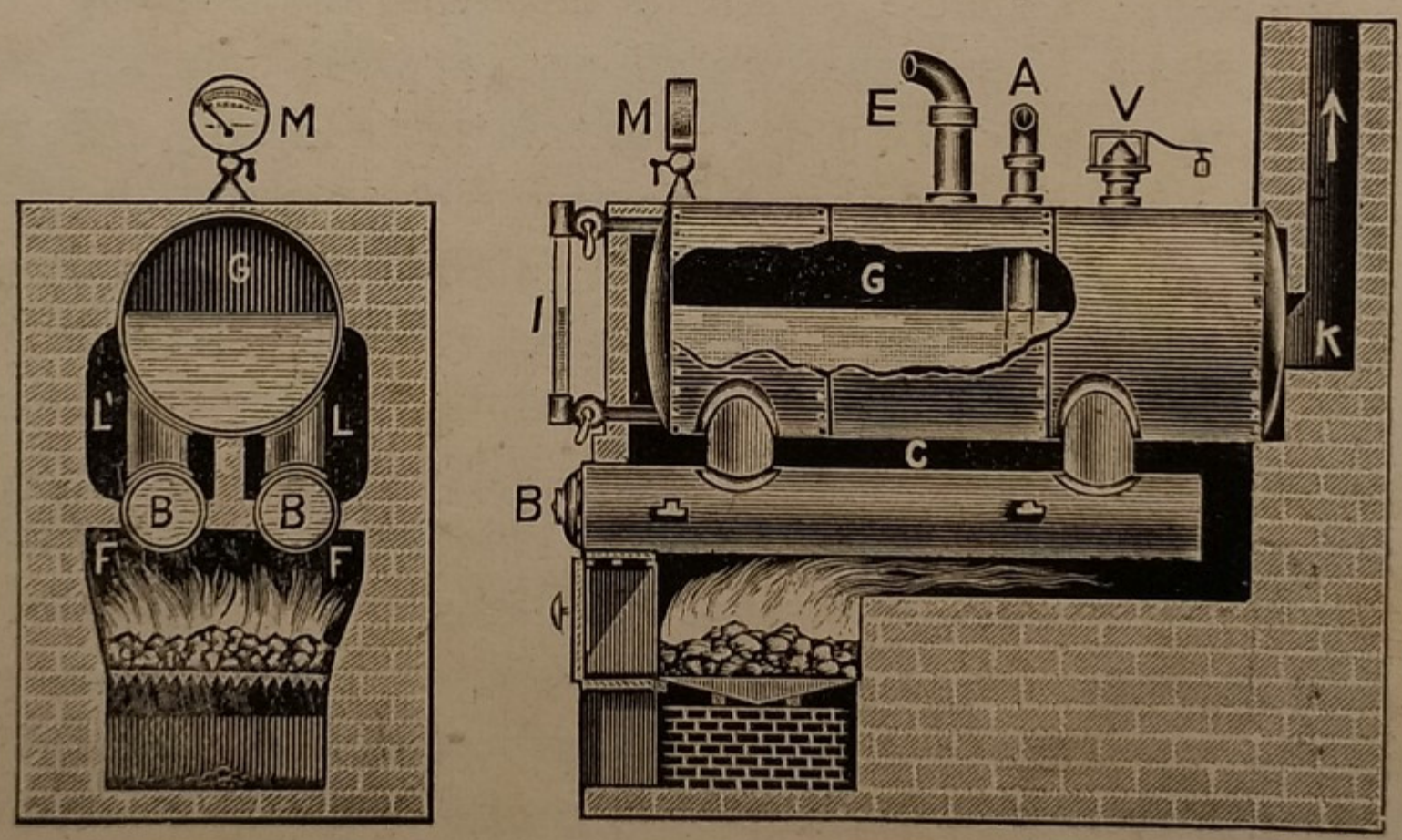

Fig. 272.

contenente dell'acqua che viene evaporata a spese del calore sviluppato dal combustibile. Per utilizzare nel miglior modo il calore si sono studiate per la caldaia disposizioni che hanno sopratutto lo scopo di presentare una grande superficie esposta alla fiamma e ai gas caldi della combustione.

La figura 272 mostra un tipo di caldaia usato per macchine fisse, con focolare esterno, e *bollitori*. In tale disposizione sotto il corpo principale *C* della caldaia, si trovano due grossi tubi *BB*, della stessa lunghezza della caldaia e con essa comunicanti, immersi nel fuoco. Il vapore che si forma in tali bollitori sale e si condensa nell'acqua del corpo principale *C* la cui acqua si riscalda rapidamente. Aumentando il numero dei bollitori si aumenta la superficie di riscaldamento.

Fig. 273.

Nelle caldaie *tubolari* (fig. 273) si ottiene lo stesso scopo obbligando le fiamme e i gas caldi della combustione a percorrere numerosi tubi come *FF*, che attraversano

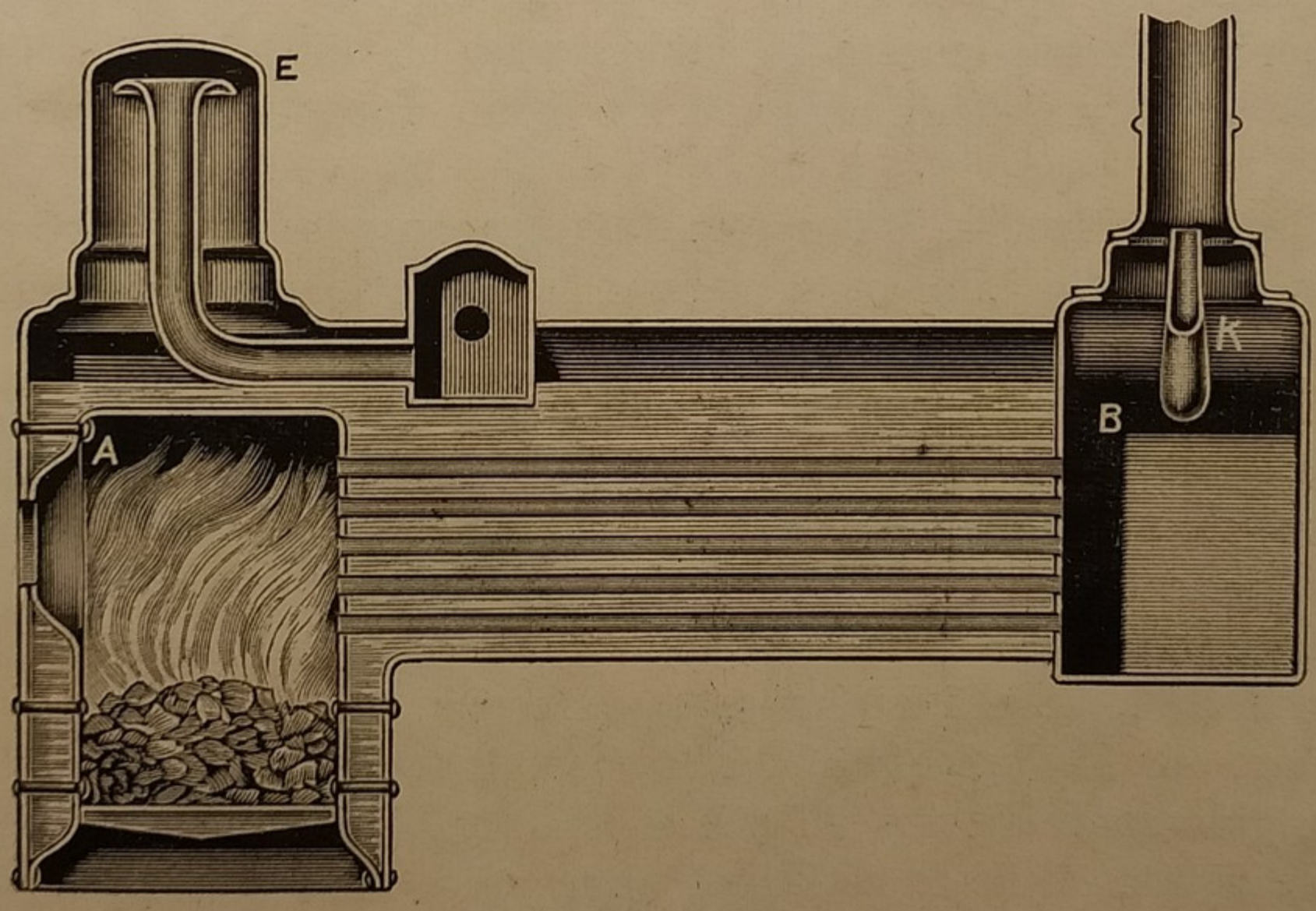

Fig. 274.

la caldaia e sono circondati dall'acqua. Questa disposizione si trova nelle locomobili e nelle locomotive, di cui la figura 274 mostra una sezione longitudinale.

In tutti i casi la caldaia è munita di accessori, che ne permettono il buon funzionamento e ne prevengono la esplosione.

Tra questi notiamo l'indicatore di pressione o *manometro*; la *valvola di sicurezza*, che abbiamo incontrata nella pentola di Papin (107); l'*indicatore di livello*, che è un tubo in vetro posto fra due tubulature metalliche che comunicano l'una colla regione della caldaia occupata dall'acqua, l'altra con quella occupata dal vapore; in questo modo al macchinista risulta in ogni istante visibile l'altezza dell'acqua in caldaia. Tale indicatore ha un'importanza massima, dappoichè, se l'acqua scendesse in caldaia a un livello troppo basso, le pareti scoperte, a contatto del fuoco si arroventerebbero, e si avrebbe la produzione d'una grande quantità di vapore al momento di una nuova introduzione d'acqua, che potrebbe determinare l'esplosione della caldaia.

Oltre agli accessori indicati, una caldaia è sempre accompagnata da *apparecchi di alimentazione*, una pompa che la macchina stessa mette in movimento, o talora un *iniettore*, sulla struttura del quale non crediamo opportuno di parlare.

128. Cilindro. — È l'organo dove, per mezzo del vapore proveniente dalla caldaia, si compie la trasformazione del calore in lavoro.

Il cilindro è un corpo di pompa a pareti robuste *A* (fig. 275), nel quale può scorrere a perfetta tenuta uno stantuffo *C*, interamente metallico, che per la pressione del vapore può assumere un moto alternativo di va e vieni. L'asta dello stantuffo, che passa attraverso a una base del cilindro con un dispositivo che permette la tenuta del vapore, è impegnata con un giunto articolato alla *biella P* e questa alla sua volta con la *manovella Q* che è rigidamente fissata all'*albero principale* della macchina. Con tale sistema il moto rettilineo alternativo dello stantuffo viene trasformato in moto rotatorio dell'albero, che fa così un giro completo per ogni corsa di andata e di ritorno dello stantuffo.

L'albero, mediante cinghie od altri congegni, trasmette il moto, secondo il bisogno, alla macchina o ai congegni che devono utilizzarlo, e per regolare tal moto una grande ruota *X*, detta *volano*, è fissata sull'albero principale.

Vediamo ora come agisce il vapore nel cilindro. Perchè lo stantuffo possa assumere il moto alternativo di va e vieni occorre aggiungere al cilindro degli organi *distributori* del

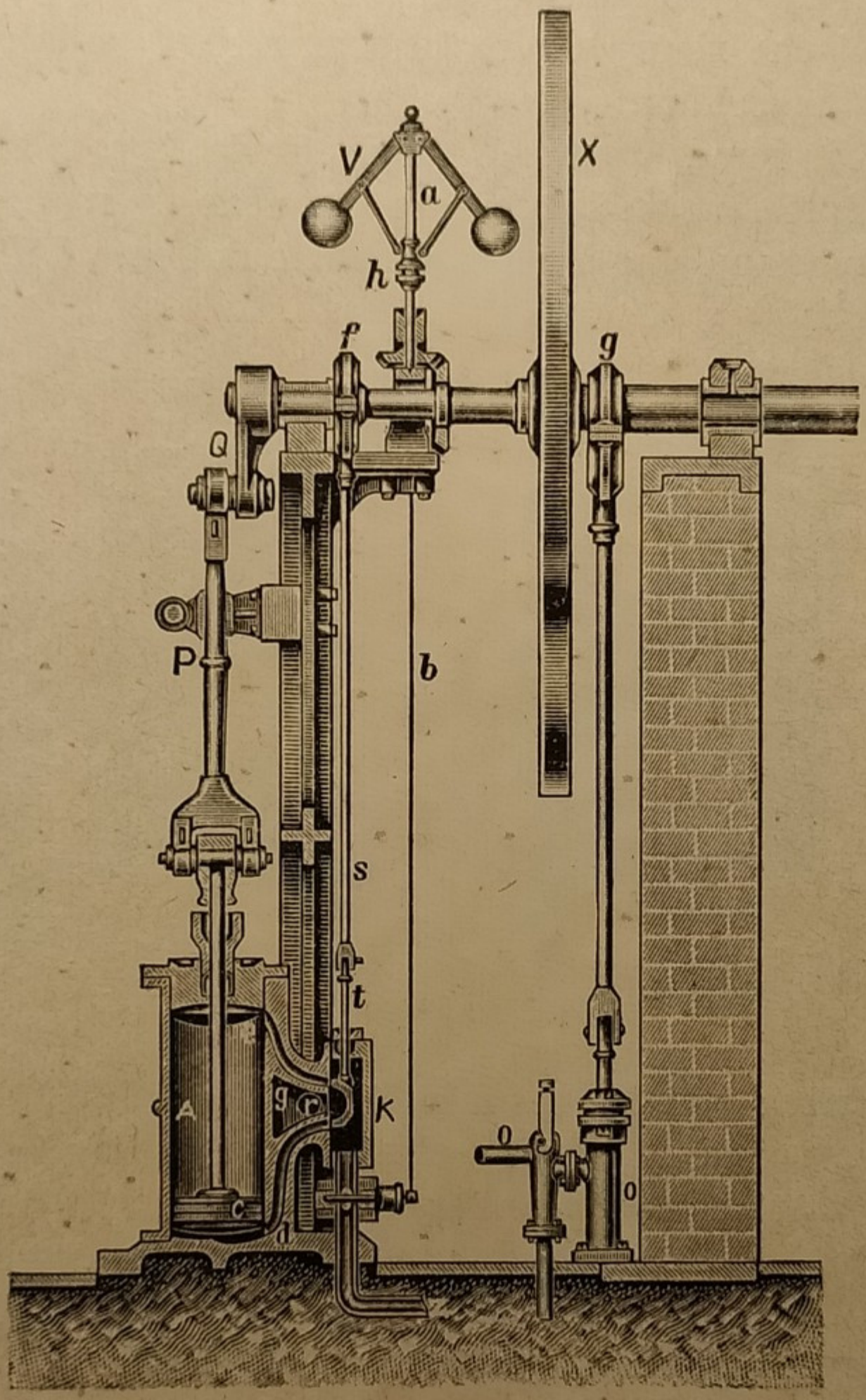

Fig. 275.

vapore. Limitiamoci alla descrizione del distributore a *cassetto*, che è largamente usato. Il vapore arriva dalla caldaia per il tubo *Z* (fig. 275) e penetra in una scatola *K* fissata lateralmente al cilindro. In una delle facce di tale scatola, dalla parte del cilindro, si aprono tre canali: due *e* e *d* finiscono

verso le basi del cilindro internamente; il canale centrale *r* comunica col condensatore o coll'atmosfera. Sopra la detta faccia scorre con moto alternativo un cassetto, detto così perchè può addirittura paragonarsi a un cassetto ordinario, guidato da un'asta *t* che riceve un moto alternativo dall'albero principale della macchina.

Il cassetto, come apparisce meglio nelle figg. 276 e 277, è capace di coprire ad un tempo solo due delle aperture descritte. In tal modo quand'esso è nella posizione indicata dalla fig. 276

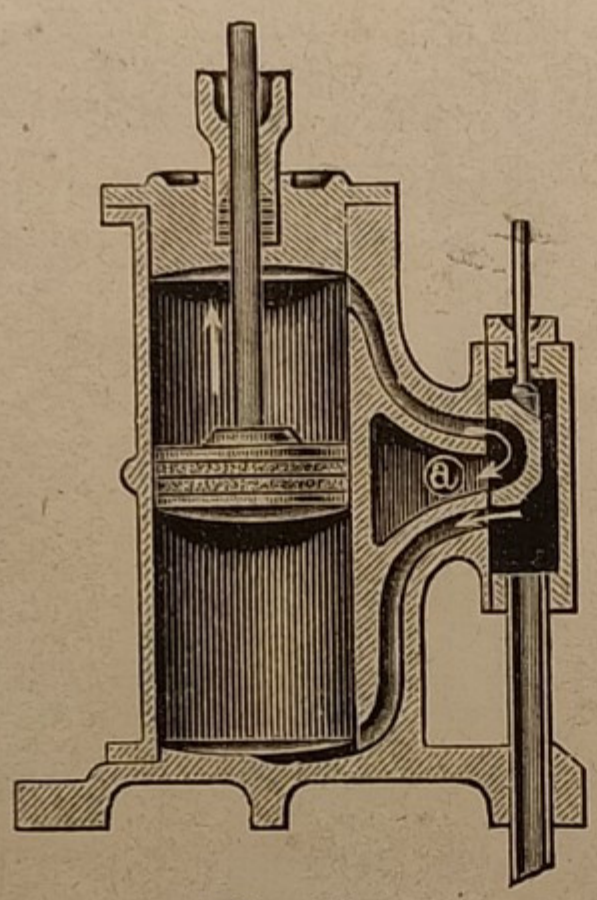

Fig. 276.

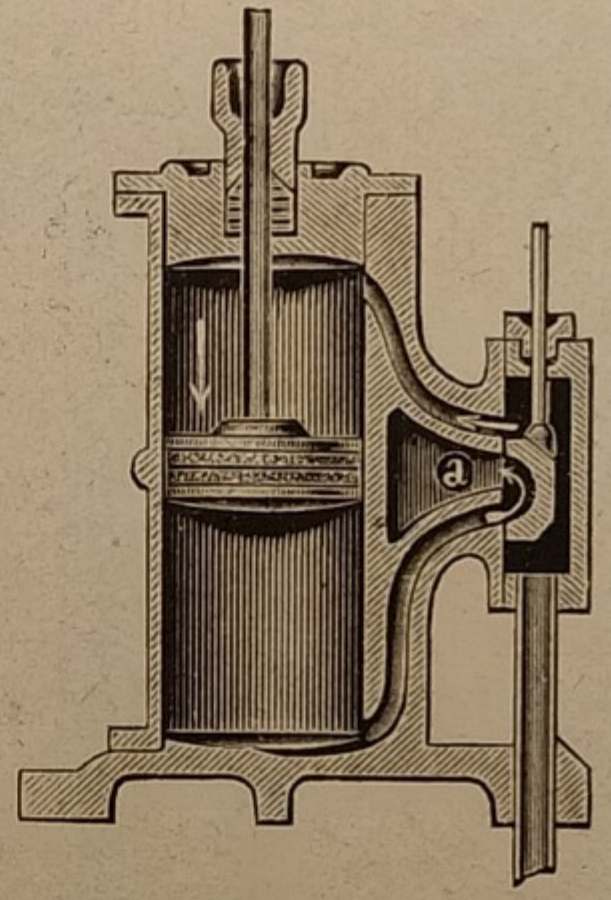

Fig. 277.

il vapore arriva nella parte inferiore del cilindro, lo stantuffo è sollevato, poichè il vapore che si trova sopra lo stantuffo è spinto attraverso il canale superiore nella cavità del cassetto e da questo, per il canale di mezzo, nel condensatore o nella atmosfera. Se allora il cassetto viene abbassato sì da coprire il foro centrale e quello inferiore (fig. 277), il vapore arriva sulla faccia superiore dello stantuffo, questo viene spinto in basso, e il vapore che gli sta sotto per il canale inferiore attraverso la cavità del cassetto è ancora spinto nel condensatore o nell'atmosfera.

Da ciò si capisce che il moto alternativo dello stantuffo è comandato dal moto del cassetto; occorre perciò che questo compia il suo moto di va e vieni con una certa corrispondenza col moto dello stantuffo. Ed è appunto mediante un sistema

di organi, sui particolari dei quali non possiamo fermarci, che il cassetto riceve il moto voluto dall'albero principale.

129. Organi regolatori. — Poichè i lavori resistenti che devono essere vinti non sono costanti, la velocità della macchina è soggetta corrispondentemente a delle variazioni; ed è appunto per evitare dei bruschi urti, che finirebbero per danneggiarne le diverse parti, che all'albero principale è unito, come si disse, il volano X (fig. 275). Per effetto della forza viva che immagazzina, il volano regolarizza il movimento durante le brevi variazioni sia del lavoro motore, sia del lavoro resistente.

Oltre a ciò il volano compie anche un altro ufficio. Quando lo stantuffo si trova alle estremità della sua corsa, la biella e la manovella sono collineari, sicchè in tali istanti la pressione del vapore è senza effetto sulla manovella, poichè allora il braccio d'azione della forza è nullo: la macchina si trova allora nei *punti morti*, come comunemente si dice. Ma il volano interviene per effetto della velocità posseduta a trascinare le diverse parti e ad oltrepassare il punto morto.

Il volano però può regolarizzare il movimento soltanto per variazioni di breve durata tra il lavoro motore e il lavoro resistente. Ma quando queste variazioni si effettuano nello stesso senso per un tempo abbastanza lungo, la velocità della macchina subisce, malgrado la presenza del volano, dei cambiamenti notevoli. Per ovviare a tale inconveniente si adatta alla motrice un organo che agisce automaticamente sull'ammissione del vapore nel cilindro. Tale organo detto *regolatore a forza centrifuga*, apparisce ancora nella figura 275. Esso è formato di un parallelogramma a lati articolati, il cui vertice superiore è unito ad un'asta a, quello inferiore ad un anello h, scorrevole lungo l'asta stessa. I lati superiori, alquanto sporgenti oltre le articolazioni laterali, portano alle estremità due sfere metalliche.

L'asta a, che porta il parallelogramma, è mantenuta in moto rotatorio dall'albero principale, mediante ingranaggi conici; dimodochè se la velocità della macchina aumenta o diminuisce, per il disquilibrio verificatosi fra il lavoro motore e il lavoro resistente, l'anello h si innalza o si abbassa; con

ciò una verga *b*, comandata dall'anello stesso, agisce sopra una valvola, che sta nel tubo di ammissione del vapore nella camera *K*, di guisa che l'ammissione del vapore diminuisce se la velocità è in aumento e aumenta se la velocità è in diminuzione.

130. Condensatore. — Il vapore, dopo aver lavorato nel cilindro, viene espulso o nell'atmosfera, e si ha allora lo *scappamento libero*, o nel *condensatore*. Si ha lo scappamento libero nelle locomotive e nelle locomobili, nei casi cioè che non si possa usare il condensatore. In tali condizioni la *contropressione*, cioè la pressione del vapore nella camera del cilindro in comunicazione coll'atmosfera, è di 1 atmosfera o poco più, e quindi la pressione *utile* è la pressione del vapore lavorante diminuita di uno.

Il condensatore è un recipiente ermeticamente chiuso, dentro o attorno al quale arriva costantemente dell'acqua fredda, sì che la sua temperatura è mantenuta piuttosto bassa. Il vapore che vi arriva vi si condensa ad una pressione che è la tensione massima del vapore alla temperatura del condensatore. Se questo è mantenuto a 50° la pressione interna è di cm. 9,23 (103), cioè di circa $^1/_8$ di atmosfera; tale dunque è la contropressione nelle circostanze indicate, sicchè la pressione utile è la pressione del vapore lavorante diminuita di $^1/_8$, con un *guadagno* di $^7/_8$ di atmosfera sopra il sistema a scappamento libero. L'acqua di condensazione viene continuamente asportata dal condensatore mediante una pompa e riportata in caldaia già abbastanza calda, ciò che costituisce un altro vantaggio del condensatore.

Ma quest'organo si può soltanto usare quando si ha a disposizione una grande massa d'acqua fredda, quindi non nelle locomotive, le quali possono appena portare seco nel *tender* l'acqua di alimentazione, nè nelle locomobili.

Il condensatore è usato nelle motrici fisse, e sempre nelle macchine marine, dove, come acqua refrigerante, serve l'acqua del mare.

131. Cenno sulle turbine a vapore o turbo-motori. — Nella macchina a vapore ordinaria occorrono, come s'è visto, degli

organi intermediari per trasformare il moto alternativo dello stantuffo in moto rotatorio dell'albero principale; il funzionamento di tali organi richiede un consumo di energia, e in certi casi, quando, ad esempio, si richiedono grandi velocità di rotazione, come avviene nelle dinamo e nelle eliche delle navi, occorre aggiungere altri organi per la moltiplicazione dei giri, con che l'inutile consumo di energia diventa anche più grande. Si aggiunga a ciò che tale complicazione di organi intermediari diventa ingombrante e aumenta ancora lo spazio richiesto, che già è rilevante per la struttura stessa della motrice a cilindro. Tale fatto ha il suo peso particolarmente a bordo delle navi, dove l'economia dello spazio ha un'importanza grandissima.

Così si venne all'adozione dei turbo-motori, che sono delle ruote ad alette contro le quali vengono a urtare i getti di vapore che provengono dalla caldaia. L'asse della ruota è lo stesso albero principale, che ne riceve così il moto direttamente. Le turbine non hanno volano, e hanno una grande velocità di rotazione, che consente di calettare senz'altro sull'albero motore l'organo rotante delle dinamo elettriche nelle officine termiche per la produzione della corrente, o l'elica della nave.

Nella stazione di elettricità di Francoforte s/M furono istallati due gruppi di 5000 kilowatts ciascuno; quello a turbina pesa 66.000 kg., quello con motore a stantuffo 400.000.

L'uso dei turbo-motori va rapidamente estendendosi su tutte le navi.

132. Rendimento d'una macchina a vapore. — Il rendimento di una macchina termica è misurato dal rapporto r fra la quantità di calore q effettivamente trasformato in lavoro e la quantità Q di calore assorbito dalla sorgente; è:

$$r = \frac{q}{Q}, \qquad (1)$$

cioè minore dell'unità.

Da considerazioni speciali fatte dalla Termodinamica e che qui non è possibile trattare, è dimostrato che una macchina termica, idealmente perfetta, ha un rendimento r espresso dalla formola:

$$r = \frac{T_2 - T_1}{T_2}, \qquad (2)$$

dove T_2 e T_1 sono le temperature *assolute* (82) della sorgente e del condensatore. Nelle macchine reali tale rendimento è assai più piccolo.

Consideriamo una macchina a vapore con caldaia a 20 atmosfere, cui corrisponde la temperatura di 215° (103), cioè la temperatura assoluta $T_2 = 273 + 215 = 488°$. Il condensatore abbia la temperatura di 50°, cioè una temperatura assoluta $T_1 = 273 + 50 = 323°$. In tali condizioni il rendimento teorico r si può calcolare mediante la formola (2); si ha:

$$r = \frac{488 - 323}{488},$$

ossia:

$$r = 0{,}33 \text{ circa.}$$

Il rendimento effettivo o industriale è molto minore: infatti una buona macchina a vapore consuma 1 kg. di carbon fossile per cavallo-ora. Tale quantità di carbone sviluppa 6500 grandi calorie, che, trasformate totalmente in lavoro, dovrebbero dare:

$$6500 \times 427 = 2.775.500 \text{ kgm.}$$

In realtà tale macchina, poichè ha la potenza di un cavallo-vapore, produce in un'ora, equivalente a 3600 secondi, il lavoro di:

$$75 \times 3600 = 270.000 \text{ kgm.}$$

ed ha perciò un rendimento che non arriva al 10 %.

Il fatto ha per la nostra Nazione un'importanza straordinaria; l'Italia non ha carboni fossili e deve con enorme spesa importarli dall'estero. Ma per fortuna l'Italia ha enormi riserve di *carbone bianco*, cioè riserve di energia idraulica. Molte cadute d'acqua sono già utilizzate, per altre si sta alacremente lavorando, di guisa che fra pochi anni l'enorme quantità d'energia delle nostre acque, trasportata a distanza mediante l'elettricità, basterà alle nostre officine e trascinerà i nostri treni, emancipandoci dal gravosissimo tributo che dobbiamo all'estero per l'importazione del carbon nero.

133. Motori a scoppio. — In questi motori, di costruzione recente, si utilizza per spingere lo stantuffo la forza dovuta all'esplosione di una miscela di vapore combustibile e di aria.

Ridotto alla massima semplicità, il motore a scoppio è costituito di un cilindro (fig. 278) nel quale è impegnato uno stantuffo *S*, che col solito sistema della biella e della manovella agisce sull'albero principale.

Prendiamo come esempio un motore monocilindrico a effetto semplice — la forza agisce solo sopra una faccia dello stan-

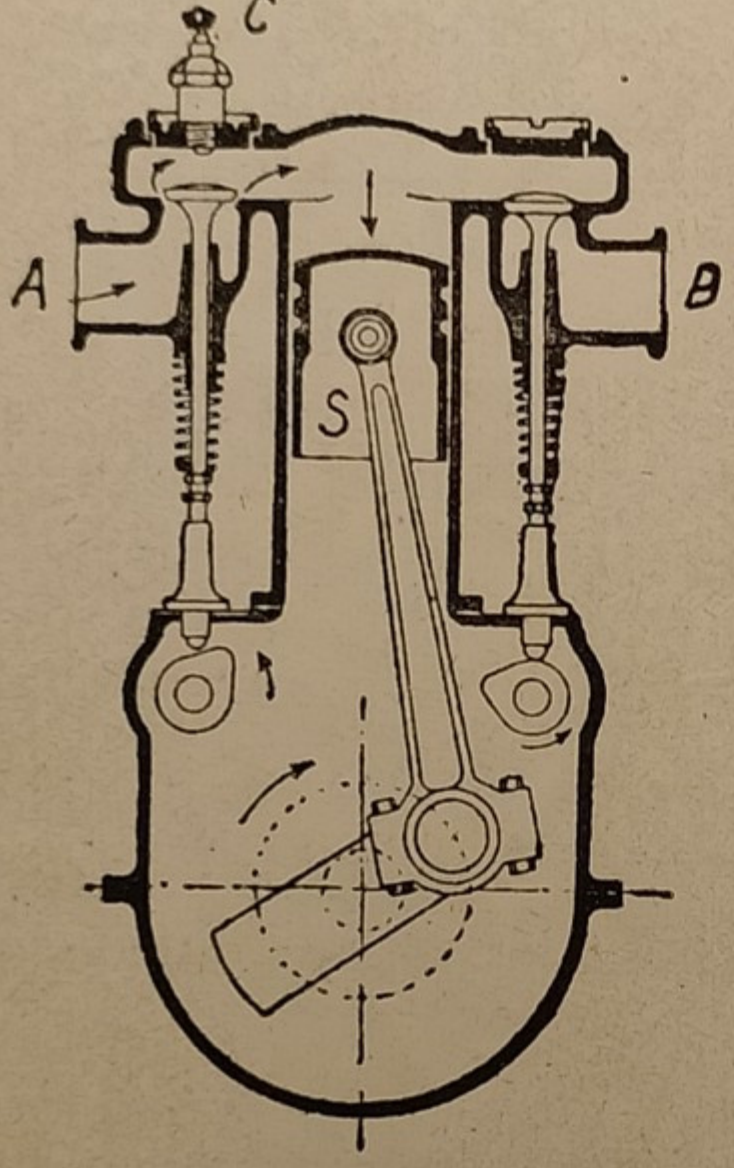

Fig. 278 *a*.

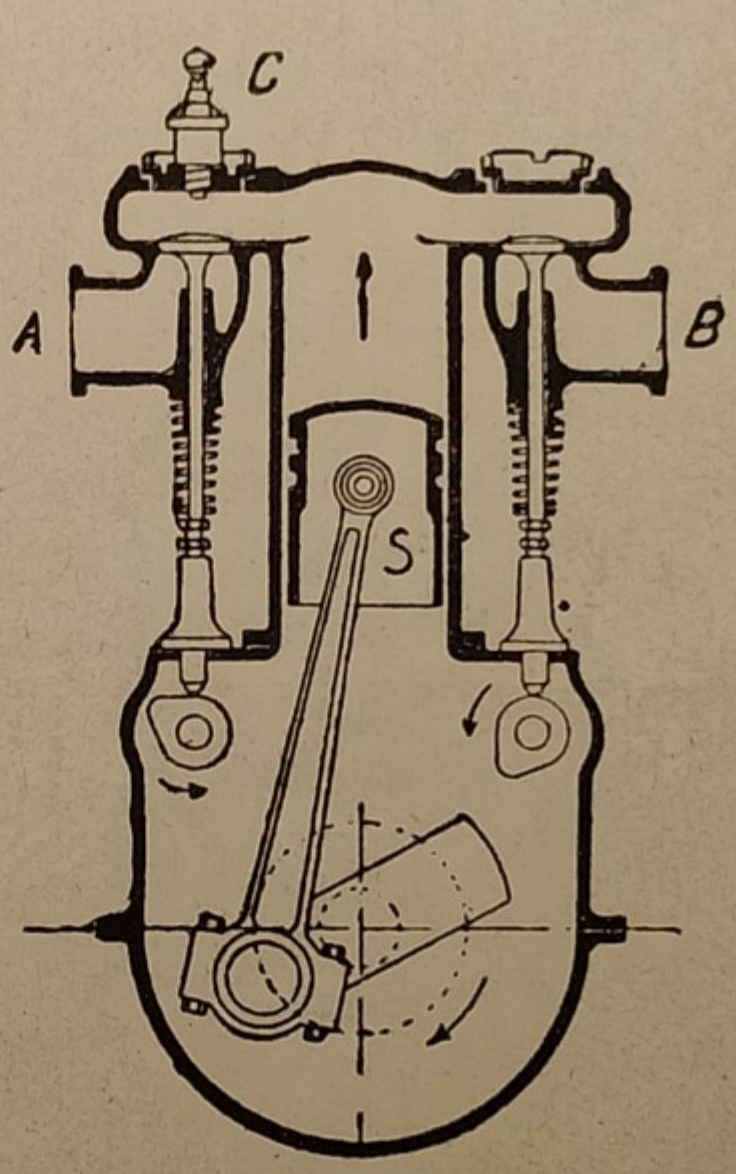

Fig. 278 *b*.

tuffo — a *quattro tempi*, nel quale cioè il funzionamento avviene in quattro corse consecutive dello stantuffo, due d'andata e due di ritorno, corrispondenti a due giri completi dell'albero principale.

1° Tempo: *aspirazione* (fig. 278 *a*). Lo stantuffo *S* per effetto di forze esterne, cioè trascinato dal volano o dalla massa della macchina già in moto, aspira da un tubo *A* l'aria e il vapore combustibile, comunemente vapore di benzina.

2° Tempo: *compressione* (fig. 278 *b*). Sempre trascinato dal volano, lo stantuffo torna verso il fondo del cilindro e comprime la miscela esplosiva in uno spazio che sta sul fondo

del cilindro detto *camera di esplosione*: i tubi *A* e *B* rimangono chiusi nel 2° tempo.

3° Tempo: *esplosione* (fig. 278 *c*). Una scintilla elettrica generata da un congegno particolare, detto *magnete*, fa esplodere la miscela, e lo stantuffo, a mo' di un proiettile di un'arma da fuoco, viene violentemente allontanato dal fondo del cilindro.

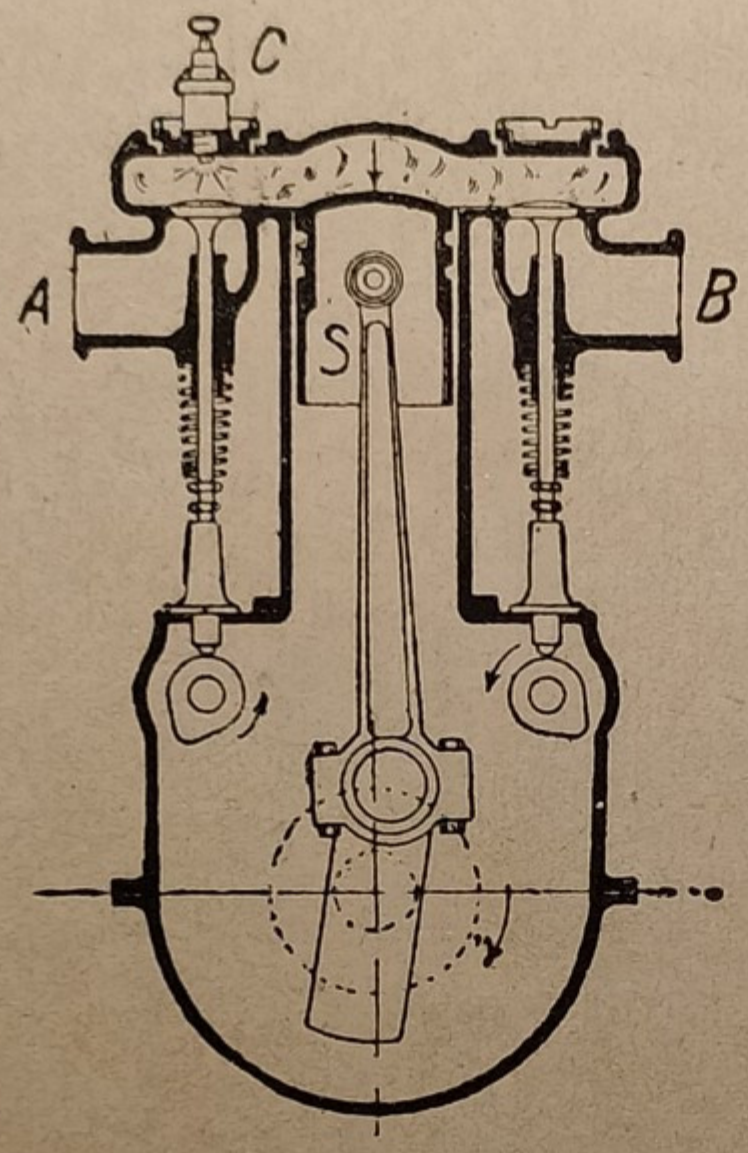

Fig. 278 *c*.

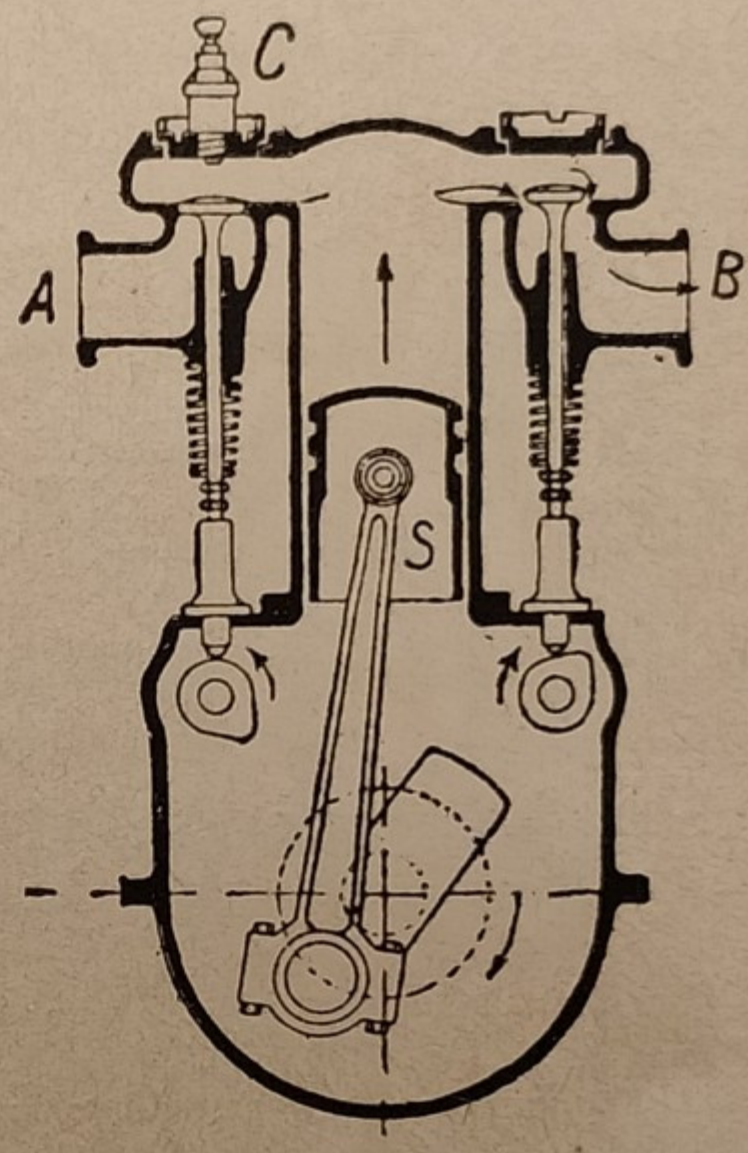

Fig. 278 *d*.

4° Tempo: *espulsione* (fig. 278 *d*). Dalle stesse forze esterne lo stantuffo viene portato indietro, e i prodotti della combustione vengono espulsi dal tubo di scarico *B*.

Tutto sommato, durante il 1°, 2° e il 4° tempo, il motore riceve lavoro dalle forze esterne; il solo 3° tempo fornisce il lavoro motore; è quindi necessario munire il motore di un volano — negli automobili fa da volano tutta la massa del veicolo — capace di raccogliere durante il 3° tempo la forza viva necessaria, sia per compiere il lavoro al quale è destinato il motore, sia per far compiere allo stantuffo le altre tre corse semplici.

Le esplosioni si succedono in questi motori con grande rapidità, per cui le pareti del cilindro vanno soggette a un forte riscaldamento, che sarebbe esiziale al buon funzionamento della

macchina; perciò il cilindro è fatto a doppia parete e nell'intercapedine si fa circolare in modo continuo dell'acqua fredda.

I motori ad esplosione non si mettono in moto da sè come una macchina a vapore; ed è perciò che nei piccoli motori delle automobili, aeroplani e simili, si fa girare direttamente l'albero motore con una manovella o con un motorino elettrico — motore di avviamento — in modo che si compia l'aspirazione e la compressione della miscela esplosiva.

Il rendimento dei motori a scoppio, data la grande differenza tra la temperatura dell'esplosione e quella dell'atmosfera in cui avviene lo scappamento, è superiore a quello delle macchine a vapore, ma un'elevata perdita di calore è prodotta dal raffreddamento del cilindro. Il rendimento può arrivare al 20 %.

Il pregio principale di tali motori sta però nella loro leggerezza; si costruiscono motori di aeroplani in cui il peso è inferiore a kg. 0,5 per HP, e sono i motori che, come già abbiamo fatto osservare, risolsero il problema della navigazione aerea.

134. Macchine refrigeranti. — La scienza del freddo si sviluppò lentamente per opera di un gran numero di Scienziati ed è nata dalle ricerche effettuate per la liquefazione dei gas (109).

Le macchine refrigeranti utilizzano dei fluidi che passano facilmente dallo stato liquido al gassoso e viceversa, cioè i fluidi più instabili. Si prestano allo scopo particolarmente i seguenti: l'*anidride carbonica*, l'*ammoniaca gassosa anidra*, l'*anidride solforosa* e il *cloruro di metile*.

Per intendere il funzionamento di una macchina refrigerante supponiamo di avere un tubo a serpentino contenente, ad esempio, dell'ammoniaca anidra già liquefatta, non importa momentaneamente come. Una pompa aspirante produce nel serpentino una depressione che determina la rapida evaporazione del liquido e una conseguente sottrazione di calore all'aria ambiente. Entra qui evidentemente in gioco il calore di vaporizzazione, di cui è detto al paragrafo 116. Un ambiente limitato in cui fosse collocato un tal serpentino diverrebbe una camera refrigerante.

È evidente però che una tal soluzione semplice porterebbe a un consumo tanto grande di gas che l'industria del freddo

non sarebbe economicamente possibile. È quindi necessario mantenere in moto un *compressore* per far ritornare la sostanza allo stato liquido. Il compressore è a *doppio effetto*, per assicurare una circolazione continua del fluido refrigerante, vale a dire serve come macchina pneumatica per facilitarne la evaporazione e come compressore vero e proprio per far ritornare nel serpentino il fluido allo stato liquido. Il serpentino evaporatore pesca interamente in un serbatoio contenente un liquido incongelabile, che è una soluzione concentrata in acqua di

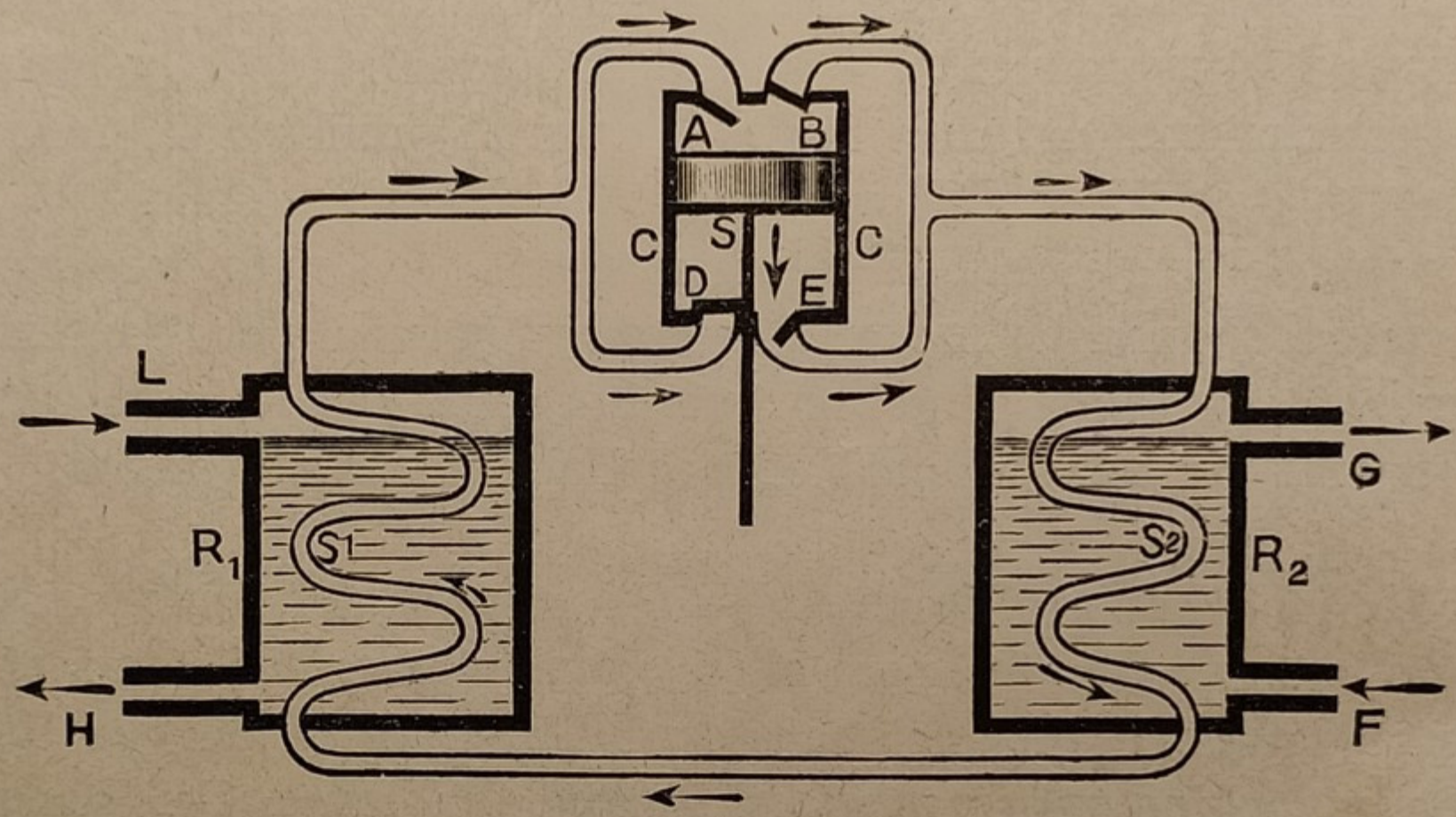

Fig. 279.

cloruro di sodio, di potassio o di calcio. Questo liquido mantenuto costantemente a bassa temperatura per effetto dell'evaporazione del fluido operante, è poi mandato in una serie di tubi che si svolgono nella camera fredda destinata a contenere le sostanze che si vogliono mantenere a bassa temperatura.

La figura schematica 279 riassume l'insieme delle diverse parti. Quando lo stantuffo S del compressore CC discende, si apre la valvola A attraverso la quale viene aspirato il gas che viene dal serpentino evaporatore S_1, e contemporaneamente si apre la valvola E attraverso la quale viene spinto nel serpentino S_2 del condensatore R_2 il gas che precedentemente era stato aspirato sotto la faccia inferiore dello stantuffo. Or quando questo s'innalza le valvole A ed E si chiudono e si aprono le D e B, attraverso la prima delle quali si compie

ancora l'aspirazione dal serpentino S_1 e attraverso la seconda il gas precedentemente aspirato viene mandato nel condensatore S_2. Il serbatoio R_1 che accoglie il serpentino evaporatore è pieno della soluzione incongelabile che si mantiene fredda e che mediante un tubo che mette capo in H ed L vien fatta circolare nella camera refrigerante.

Notisi infine che attorno al serpentino S_2 del condensatore, mediante i tubi F e G si fa circolare continuamente dell'acqua fredda per sottrarre al fluido il calore dovuto alla compressione.

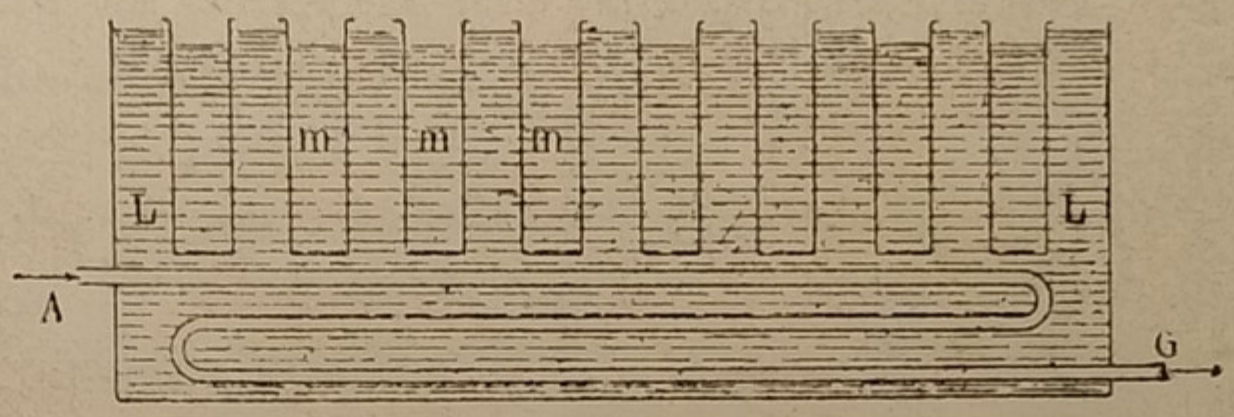

Fig. 280.

Nelle fabbriche di ghiaccio artificiale il recipiente R_1 che contiene il serpentino evaporatore, è una vasca LL (fig. 280) nella quale il serpentino evaporatore è rappresentato dal tubo AG. Nella soluzione incongelabile contenuta in detta vasca si immergono le vaschette parallelepipede mm contenenti l'acqua pura che si trasforma in ghiaccio.

Non è chi non conosca l'importanza attuale degli impianti frigoriferi destinati, oltre che alla fabbricazione del ghiaccio, alla conservazione di molte sostanze alimentari — carni, uova, ecc. — dato che il freddo ne impedisce l'alterazione causata dal caldo e dai microorganismi. Grandiosi impianti frigoriferi si trovano a bordo dei piroscafi che trasportano da un luogo all'altro della Terra merci deperibili. Le ferrovie dispongono allo stesso scopo di vagoni refrigeranti.

Riscaldamento e ventilazione degli ambienti abitati e industriali.

135. Apparecchi di riscaldamento. — Il riscaldamento artificiale degli ambienti abitati e industriali durante la fredda stagione ha un'estrema importanza per assicurare all'uomo una delle

condizioni più favorevoli per lo svolgimento regolare delle sue attività. Tale riscaldamento è ottenuto in varie maniere, in relazione alle diverse condizioni degli ambienti; in tutti i casi il sistema riscaldante deve versare nell'ambiente le calorie necessarie per compensare le perdite di calore attraverso i muri, i soffitti, i pavimenti; perdite che dipendono da varie circostanze: spessore dei muri, loro natura ecc., e dalla differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno.

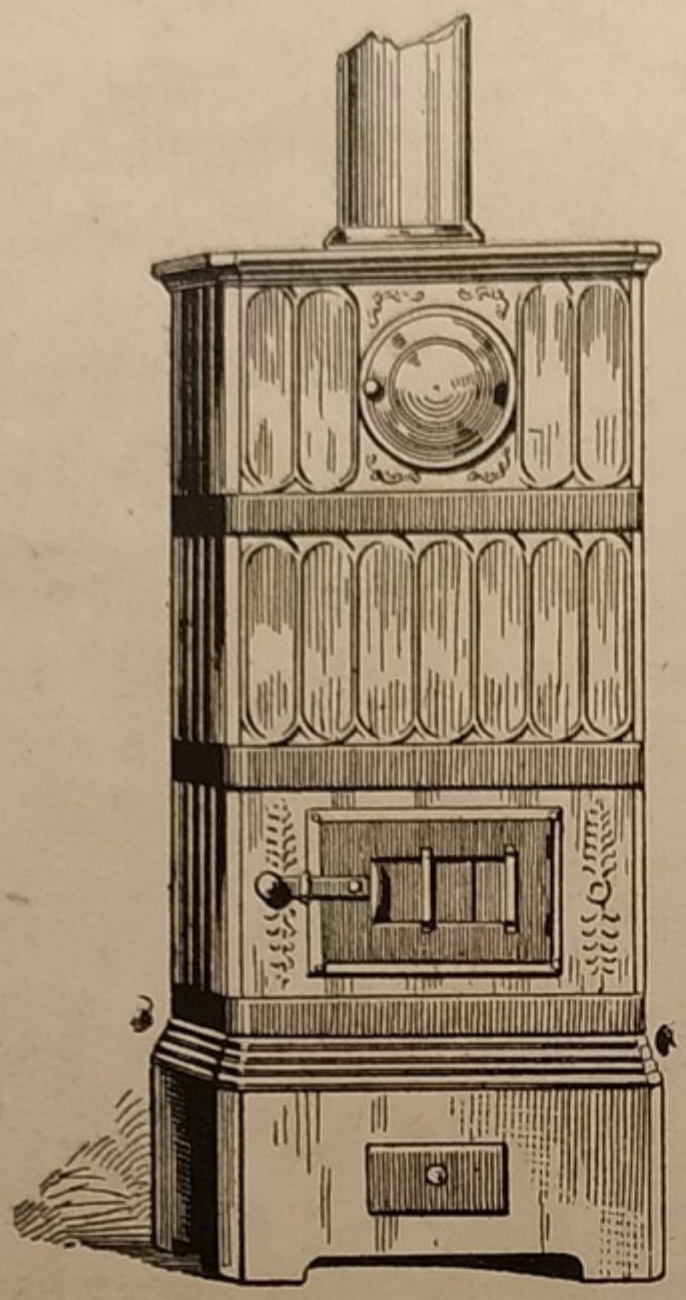

Fig. 281.

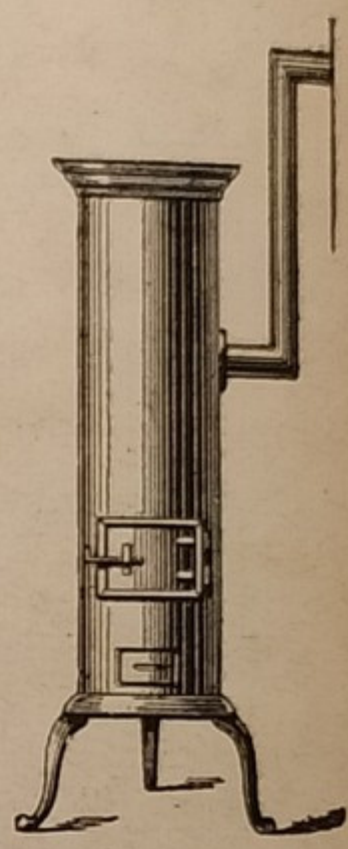

Fig. 282.

I piccoli ambienti vengono ancora, specialmente nei paesi, riscaldati mediante *stufe*, che sono focolari chiusi entro un inviluppo di terracotta o di metallo, muniti di camino per smaltire i prodotti della combustione (fig. 281 e 282). Le stufe hanno un rendimento abbastanza elevato, potendo utilizzare fino ai 9/10 del calore sviluppato dal combustibile. Presentano però diversi inconvenienti: assicurano uno scarso ricambio d'aria dell'ambiente; il pulviscolo atmosferico a contatto delle pareti metalliche, che spesso si

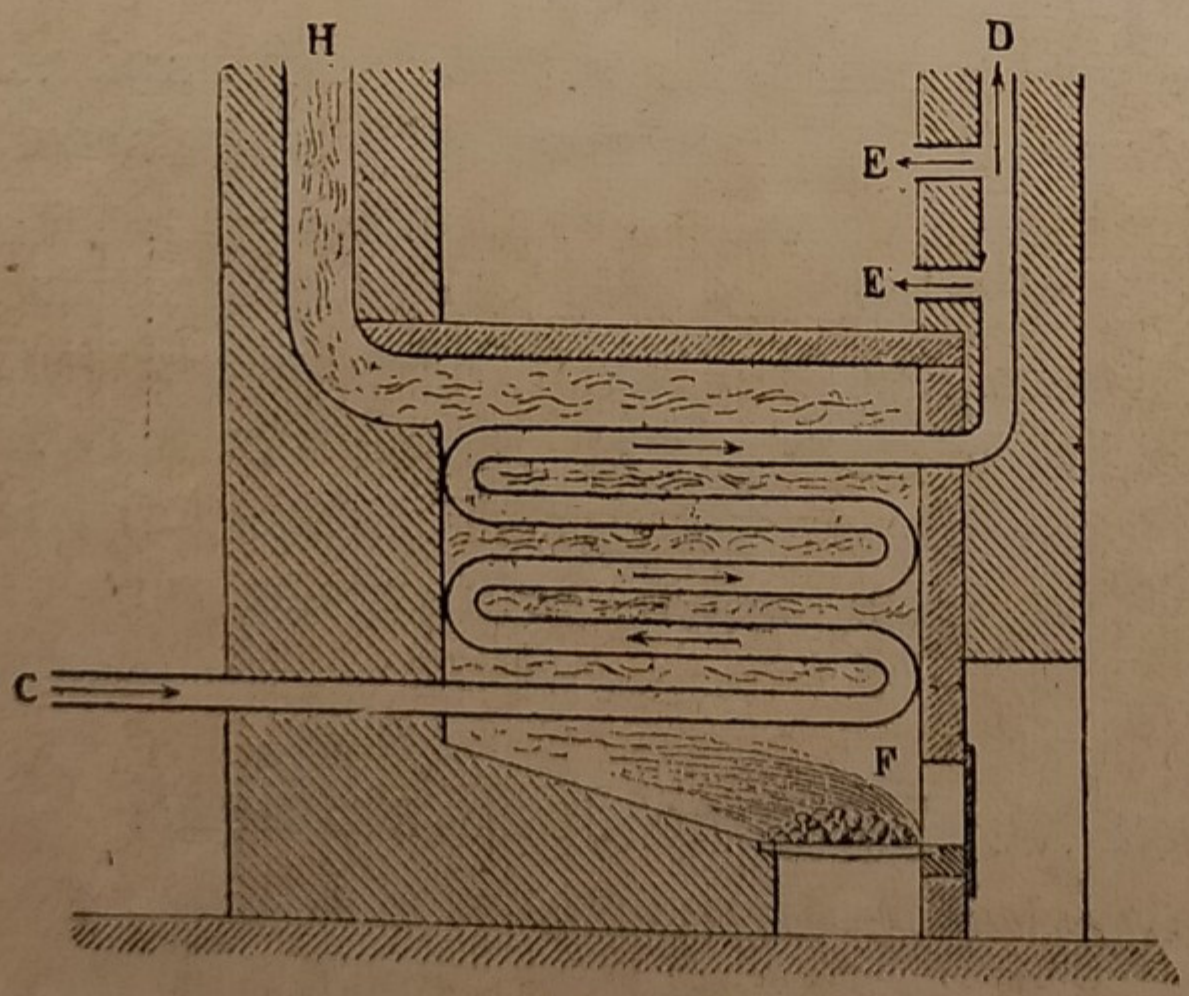

Fig. 283.

riscaldano eccessivamente, brucia e dà cattivo odore; l'aria dell'ambiente riesce troppo asciutta, ciò che rende necessario di porre sopra la stufa una ciotola con acqua, che evaporando dà all'aria l'umidità perduta.

Vanno assolutamente proscritte le stufe esclusivamente metalliche; occorre che il focolare sia circondato da un rivestimento di terra refrattaria, per impedire alle pareti metalliche di arroventarsi, per il qual fatto diventano permeabili all'ossido di carbonio, velenosissimo, che si diffonderebbe nella stanza.

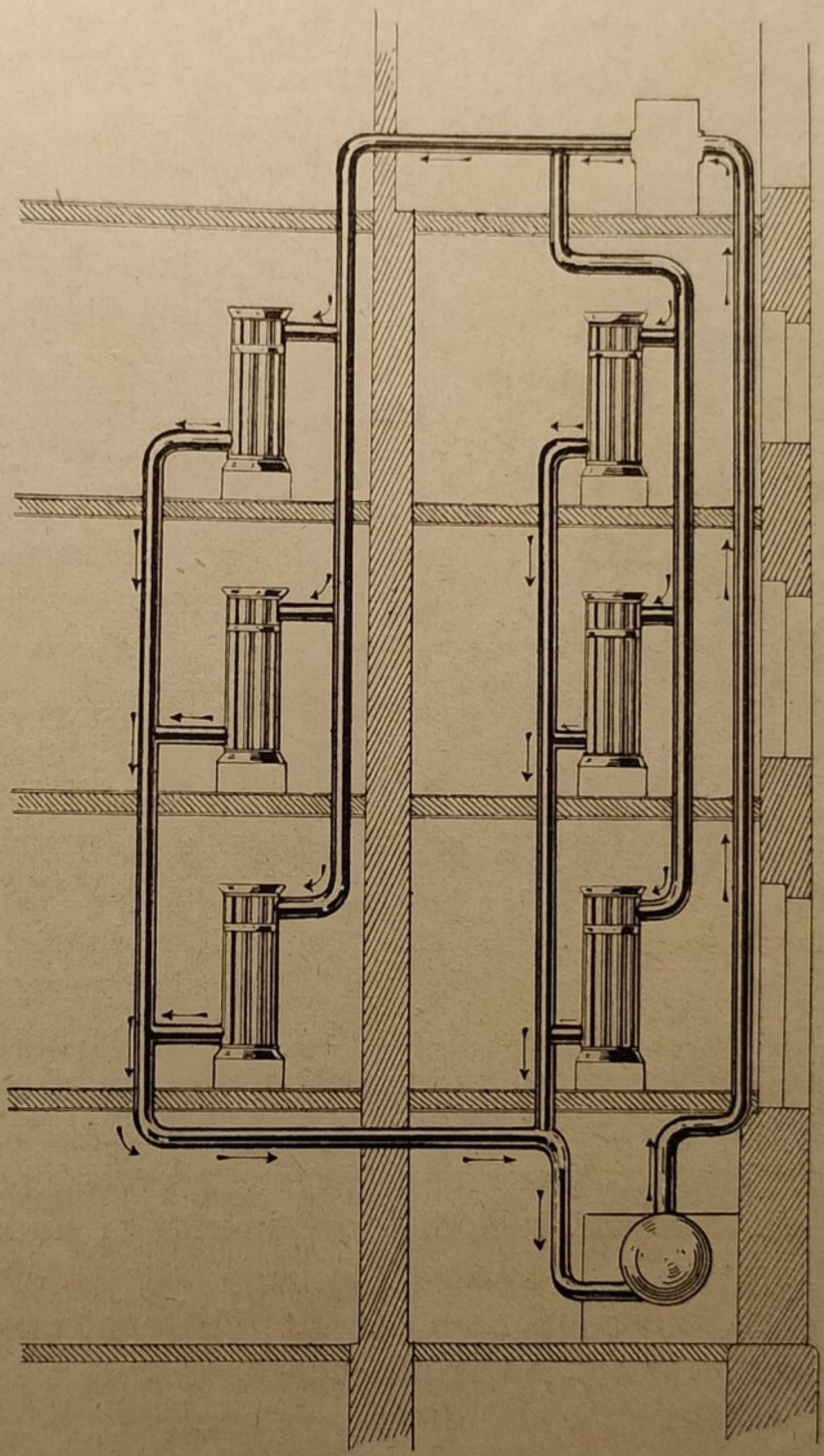

Fig. 284.

I *caloriferi* sono focolari di grandi dimensioni atti a riscaldare un intero appartamento e spesso anche tutto un edifizio. Si hanno tre specie di caloriferi: 1° *ad aria calda*; 2° *a vapore*; 3° *ad acqua*.

Il *calorifero ad aria calda* (fig. 283) è formato di un focolare *F*,

collocato nel sotterraneo, che scalda una serie di tubi a zig-zag i quali aspirano l'aria dall'esterno per *C* e la portano negli ambienti attraverso le *bocche del calore E*.

Nei *caloriferi a vapore* (fig. 284) una caldaia, posta pure nei sotterranei, produce vapore a poco più di 100°. Questo vapore vien portato da tubi nei diversi ambienti dove sono installati i *radiatori* (fig. 285) formati di tubi ad alette o a superficie irregolare così da presentare una larga superficie a contatto dell'aria dell'ambiente. Il vapore che si condensa, abbandona il calore di vaporizzazione (116) in ragione di 538 grandi calorie per ogni chilogrammo di vapore che si condensa. L'acqua di condensazione, a temperatura di poco inferiore ai 100°, torna in caldaia per rievaporizzarsi.

Fig. 285.

I *caloriferi ad acqua*, detti anche *termosifoni*, sono formati in modo simile a quelli a vapore, soltanto che in questo caso, caldaia, tubazioni e radiatori sono totalmente pieni d'acqua. L'acqua riscaldata in caldaia diminuendo di densità, sale nei radiatori, vi circola raffreddandosi, per cui aumentando di densità torna in caldaia, dove si riscalda di nuovo, e così la circolazione continua è assicurata.

Negli impianti industriali si usa quasi sempre il riscaldamento a vapore, questo essendo generato in più dalle caldaie destinate a generare il vapore per altri bisogni. I radiatori sono semplici tubi di ferro, muniti di numerose alette posti orizzontalmente.

La tecnica del riscaldamento ha ormai raccolto una completa serie di dati relativi alle perdite di calore negli ambienti, alle caratteristiche dei diversi sistemi e quindi può assicurare la costanza della temperatura voluta nei diversi casi.

136. Ventilazione. — È noto che l'aria degli ambienti abitati per effetto della respirazione delle persone si arricchisce di anidride carbonica in modo che se l'ambiente fosse chiuso l'aria

diventerebbe rapidamente irrespirabile. Anche più della anidride carbonica sono dannose le esalazioni organiche di varia natura emesse dalla pelle, che generano malessere e non di rado deliquio. Le cose poi peggiorano negli stabilimenti industriali, dove spesso si ha la formazione di grande quantità di pulviscolo che entrando nei polmoni produce serie malattie; in altri casi si hanno emanazioni di vapori acidi. È perciò di assoluta importanza sottrarre l'aria guasta e sostituirla con aria pura presa all'esterno.

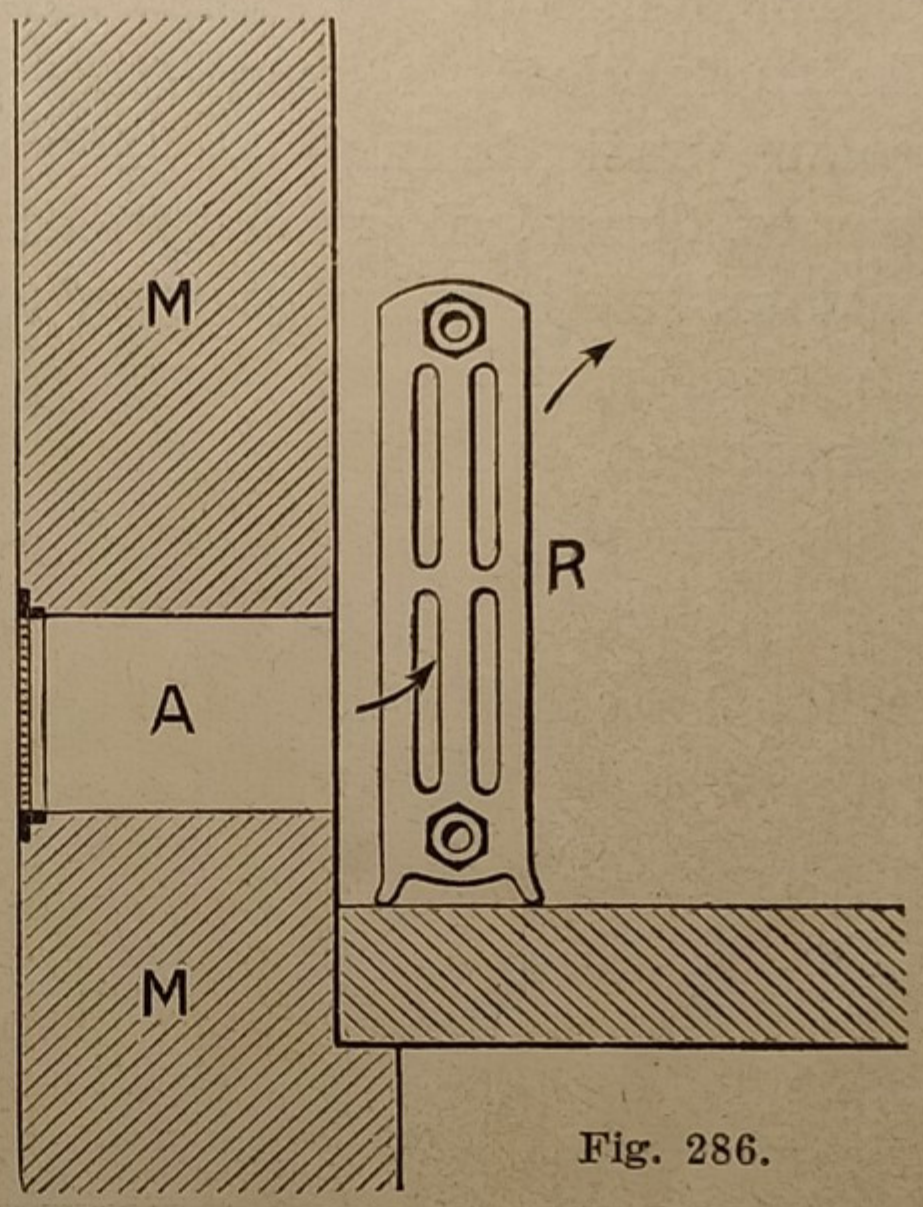

Fig. 286.

Il ricambio è ottenuto con la *ventilazione*, che può essere *naturale* e *artificiale*. La *ventilazione naturale* consiste in un ricambio d'aria spontaneo attraverso eventuali fenditure, attraverso i muri, i pavimenti ecc. In certi casi si attiva aprendo di tanto in tanto le finestre o adattando nella parte superiore di queste un telaio mobile intorno a un asse orizzontale, che lascia un'apertura in alto, così da non produrre correnti moleste o dannose.

La *ventilazione artificiale* può effettuarsi o per differenza di temperatura o con *ventilatori* veri e propri. La ventilazione per differenza di temperatura è largamente messa in opera negli stabilimenti scolastici, ospedali e simili, ricorrendo alle disposizioni della figura 286. I radiatori *R* vengono collocati a ridosso di un muro esterno *MM*, che porta un'apertura *A*, munita esternamente di una rete metallica, comunicante con l'esterno. In tal modo la corrente d'aria pura richiamata per *A* lambendo il radiatore si riscalda e arriva nell'interno senza produrre alcun senso di molestia. Per smaltire poi l'aria viziata, negli ambienti sono poste delle bocche con sportelli regolabili, comu-

nicanti con canali verticali, come camini, che finiscono sul tetto in comignoli. Le bocche sono duplici, vale a dire poste in alto e in basso; d'estate si fanno agire quelle in alto, d'inverno quelle in basso. In tal maniera l'aria della stanza rimane fresca d'estate e calda d'inverno.

I *ventilatori*, quasi sempre centrifughi, azionati da un apposito motore, sono destinati a un più abbondante e rapido ricambio d'aria, quale si conviene spesso negli ambienti industriali. La ruota alata del ventilatore è compresa in un'apertura circolare praticata in alto e talora in basso in un muro dell'ambiente. Quando il ventilatore è in alto agisce per espellere l'aria viziata, se è in basso per il richiamo dell'aria pura dall'esterno. In quest'ultimo caso l'aria in certi casi è preventivamente filtrata, se è d'inverno riscaldata e se d'estate raffreddata.

BREVI NOZIONI DI METEOROLOGIA

La Meteorologia è lo studio dei fenomeni atmosferici e il suo ultimo scopo è la *previsione del tempo.*

137. L'atmosfera terrestre. — Si chiama con questo nome la massa d'aria che circonda tutta la Terra per un'altezza non determinata e che fa parte integrante della Terra, restando ad essa indissolubilmente unita per effetto del suo peso, dimodochè l'atmosfera segue sempre la Terra nei suoi moti di rotazione e di traslazione.

È logico che l'atmosfera debba avere la forma della Terra e che presenti anzi uno schiacciamento ai poli più grande della Terra, a causa della maggior forza centrifuga, cui sono soggette le parti equatoriali dell'atmosfera, per la maggiore distanza di queste dall'asse di rotazione. È anche probabile che l'atmosfera abbia le sue maree prodotte dalle stesse cause che producono le maree negli Oceani.

L'atmosfera, oltre a fornire coi suoi elementi chimici le condizioni di vita a quasi tutti gli esseri viventi, è la sede di una vastissima serie di fenomeni, che hanno la più grande importanza; basta citare i venti, le precipitazioni acquee, la distribuzione delle temperature alla superficie terrestre, ecc.

Le indicazioni barometriche, lo studio del crepuscolo e delle stelle cadenti ci assicurano dell'esistenza dell'aria ancora a 80 km. di altezza. Però la massima altezza raggiunta dall'uomo in aeroplano è di circa 12 km., quella raggiunta in pallone assai maggiore. Il prof. Piccard di Bruxelles, con un pal-

lone sferico, opportunamente attrezzato, raggiunse con due celebri ascensioni, fatte il 27 maggio 1931 e il 18 agosto 1932, rispettivamente le altezze di 15.781 m. e 16.700 m.

Un pallone sonda lanciato da Pavia nel 1913 raggiunse i 37.700 m.

Però la parte dell'atmosfera che è sede di tutte le perturbazioni, tempeste, burrasche, cicloni ecc., detta appunto *zona delle perturbazioni* arriva a 3500 m., ed è in questo strato d'aria relativamente sottile che si trova la quasi totalità del vapor d'acqua.

La zona fra 3500 e 11 mila metri è formata d'aria calma, senza movimenti orizzontali, salvo nel limite superiore dove avvengono delle correnti dai poli verso l'equatore: i *controalisei*.

La zona fino a 11 mila metri è detta *troposfera*, quella superiore *stratosfera*.

138. Temperatura dell'aria. — L'aria riceve il calore dal Sole indirettamente dal suolo, essendo essa quasi *diatermana*, ossia trasparente ai raggi solari, e il calore che nel corso di una giornata riceve dal Sole una certa porzione della superficie terrestre dipende dalla latitudine. A tale riguardo i punti della superficie terrestre si sogliono raggruppare in 5 zone: la *zona equatoriale*, compresa fra i tropici; le due *temperate*, comprese fra i tropici e i circoli polari e le *calotte polari* che hanno per vertice i poli. In una stessa zona poi la quantità di calore che arriva dal Sole varia con le stagioni, ciò che in massima parte dipende dalla diversa inclinazione che in media hanno i raggi solari e anche dalla diversa durata dei giorni.

La misura della temperatura dell'aria in un dato luogo si valuta col termometro e quasi sempre col termometro a mercurio.

Negli Osservatorî meteorologici si hanno anche termometri a massima e minima sui quali si fa una lettura ogni 24 ore, come si è esposto nella Termologia. Talora si hanno anche *termometri registratori* che tracciano il diagramma su di un foglio avvolto sopra un cilindro girevole, come avviene nel barometro registratore (49). Questi termometri hanno un

bulbo metallico *A*, molto appiattito e piegato ad arco, ermeticamente chiuso e pieno totalmente di alcool (fig. 287). Crescendo la temperatura l'alcool si dilata e determina sulle pareti interne del serbatoio un aumento di pressione al quale consegue una diminuzione della curvatura del serbatoio stesso, dimodochè, essendo esso fisso ad un solo estremo, l'altro estremo si muove trasmettendo il suo movimento a un pennino che segna sulla carta del cilindro girevole. Tale bulbo agisce perfettamente come il tubo metallico del manometro Bourdon.

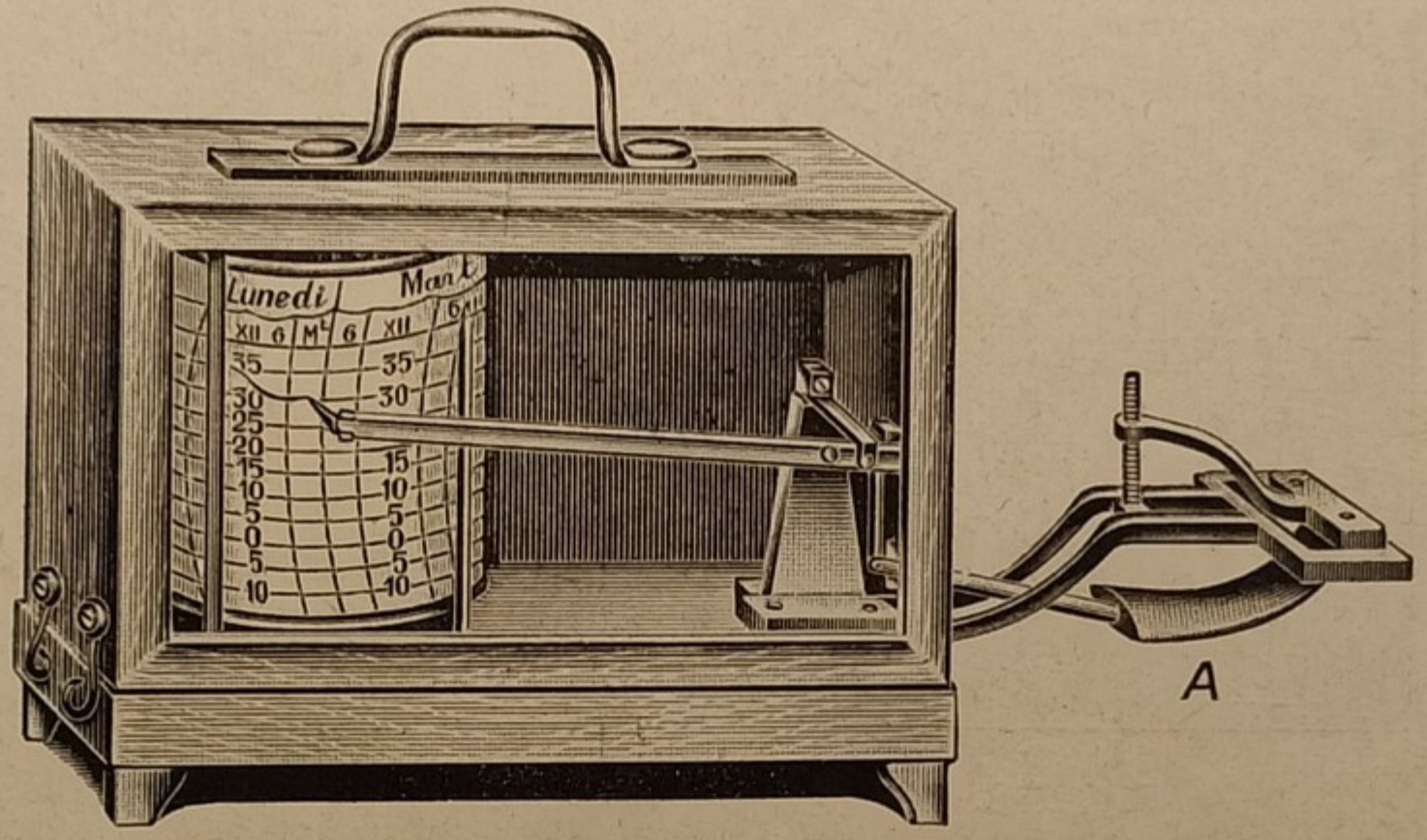

Fig. 287.

Però, qualunque sia il termometro adoperato, affinchè le letture termometriche sieno fra loro paragonabili, occorre che sieno fatte con delle norme fisse. Infatti si comprende che se un termometro è esposto direttamente ai raggi del Sole o al riverbero di tali raggi, il bulbo assorbirà del calore che non potrà poi abbandonare se non che per conducibilità, cioè molto lentamente e il termometro presenterà un eccesso di temperatura sull'aria ambiente.

Osserviamo ancora che se l'aria circondante il termometro fosse immobile, essendo la massa del termometro grande rispetto a quella dell'aria, le indicazioni del termometro risulterebbero in ritardo se la temperatura dell'aria variasse rapidamente. Per ovviare a tali inconvenienti e ad altri che per ragione di brevità si omettono, la Meteorologia ha fissato delle norme.

Innanzi tutto notiamo che uno dei compiti principali di questa Scienza è la misura delle temperature all'*aria aperta*. La vicinanza di grandi fabbricati che hanno una temperatura propria, diversa da quella dell'aria circostante, per la presenza di fuochi interni, turba le indicazioni del termometro e perciò questo va posto a circa due metri dal suolo che deve essere erboso, lontano da fabbricati, protetto da ripari, gabbie o capannine che assicurino la libera circolazione e che riparino l'apparecchio dall'azione diretta del Sole e dalla pioggia. La figura 288 mostra una eccellente capannina usata dal R. Magistrato delle Acque di Padova.

Fig. 288.

Nell'interno delle città quando non si può disporre di orti o giardini si ricorre a capannine poste su terrazze, ma allora conviene che siano coperte di legno e sovrastino di alcuni metri tutti i tetti vicini.

Buon consiglio è di usare il *termometro-fionda*: è un piccolo termometro a mercurio che si fa girare come una fionda attaccandolo all'estremità di un cordoncino, l'altra estremità essendo tenuta in mano. Ci si pone in un luogo ben scoperto, il più possibile all'ombra e in faccia al vento, poi si fa girare rapidamente il termometro ed arrestatolo si legge immediatamente la temperatura, per non dar tempo al calore del nostro corpo di influenzarlo. Si ripete la prova per due o tre volte consecutive per assicurarsi della concordanza delle indicazioni. Il movimento sottrae il termometro-fionda in gran parte all'influenza del riverbero e soprattutto lo mette in contatto con una grande massa d'aria, ciò che costituisce la condizione più importante affinchè l'equilibrio di temperatura si verifichi rapidamente. Fatto girare anche in pieno Sole, tale termometro segna appena qualche decimo di grado in più della temperatura dell'aria.

139. Variazione diurna della temperatura. — La lettura del termometro fatta in diverse ore del giorno, o meglio l'esame del tracciato del termografo, mostrano che la temperatura varia durante un'intera giornata, presentando un massimo dopo mezzogiorno, verso le 14 circa, e un minimo poco dopo la levata del Sole. L'aumento della temperatura al mattino avviene più rapido della diminuzione al pomeriggio; dopo il tramonto la diminuzione è lentissima.

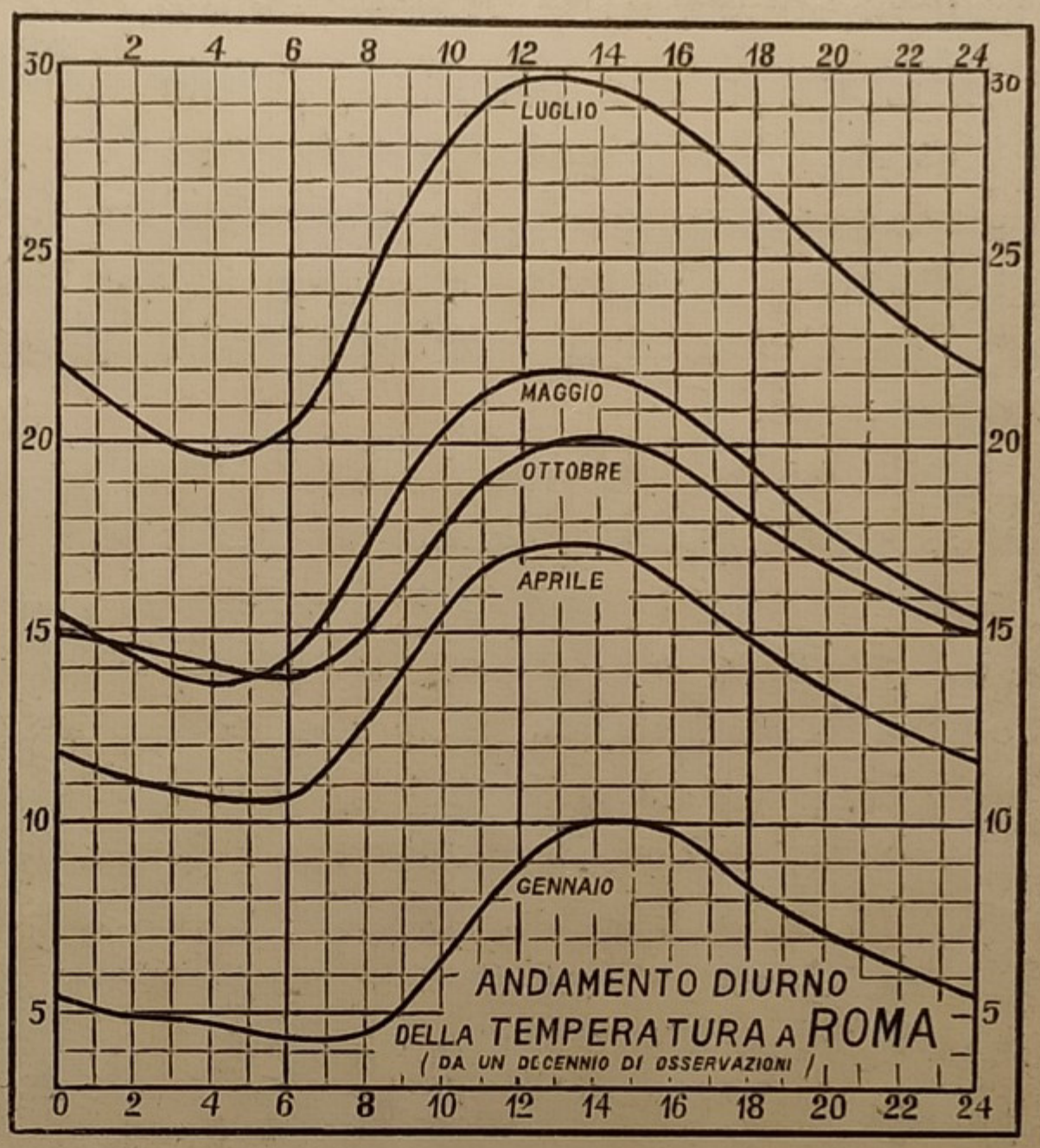

Fig. 289.

Si capisce facilmente che l'ora del minimo deve seguire da vicino la levata del Sole: la temperatura diminuisce infatti progressivamente durante la notte per causa dell'irradiamento verso gli spazi celesti, finchè il calore inviato dal Sole, che si leva, durante un certo tempo diventa superiore a quello irradiato. Così l'ora del massimo non coincide col mezzodì, nel momento in cui il Sole invia la più grande quantità di calore, ma notevolmente più tardi, poichè la quantità di calore ricevuta in un momento qualunque si addiziona a quella già raccolta nei momenti anteriori, in modo che, se non ci fosse alcuna perdita, la temperatura aumenterebbe di continuo dalla levata al tramonto; ma via via che la temperatura si eleva, aumentano le perdite per irradiamento, e così arriva il momento, compreso fra mezzodì e il tramonto, nel quale il calore ricevuto durante un certo tempo, calore che dal mezzodì al

tramonto va diminuendo, diventa eguale a quello irradiato. È in questo momento che la temperatura cessa di salire; da allora in poi, il Sole continuando ad abbassarsi, la perdita di calore supera il guadagno e la temperatura diminuisce. La fig. 289 mostra l'andamento diurno della temperatura a Roma in diversi mesi, andamento che si svolge secondo quanto sopra è stato spiegato.

140. Cause che modificano l'andamento diurno della temperatura. — L'*ampiezza diurna* della temperatura detta anche *escursione diurna*, cioè la differenza fra il massimo e il minimo giornaliero, dipende non solo dalla latitudine, ma anche da altre condizioni: nebulosità, situazione topografica, altitudine, ecc.

Se il cielo è completamente coperto, la temperatura sale poco durante la giornata e poco scende durante la notte, perchè le nubi, operando da schermo, diminuiscono la quantità di calore che arriva di giorno dal Sole e impediscono di notte l'irradiamento; per conseguenza l'escursione diurna in un dato luogo, sarà minore a cielo coperto che a ciel sereno.

A parte ciò si riscontra che l'escursione diurna è maggiore nelle località interne dei continenti che nelle località presso il mare; le grandi masse d'acqua infatti compiono la funzione di regolatrici della temperatura.

Anche nelle località interne l'escursione diurna può presentare notevoli differenze a seconda della natura del suolo. In regioni coperte da abbondante vegetazione l'escursione diurna è relativamente piccola, perchè durante il giorno la massima parte del calore solare è assorbito dalle piante, impiegato in parte a produrvi le reazioni chimiche della vita vegetale e in parte a evaporare l'acqua che le piante traspirano; la temperatura non può quindi salire molto durante il giorno. Di notte il vapor d'acqua traspirato dalle piante ostacola l'irradiamento sia direttamente, sia per ragione dell'annebbiamento che può produrre nell'aria.

141. Media diurna. — A rigore per avere la media temperatura diurna *vera* in un dato luogo, occorrerebbe fare un numero sufficientemente grande di letture del termometro

equidistanziate nel periodo delle 24 ore, e farne la media aritmetica. Ciò richiederebbe l'opera di un personale in ore incomode o il possesso di buoni termometri registratori. Per ovviare a tali difficoltà si fa di solito una media detta *media ridotta*, ottenuta facendo la media aritmetica fra le letture delle 9 e delle 21, la massima e la minima. Tale media ridotta differisce assai poco dalla media vera; ad es., la media ridotta differisce per Roma dalla media vera di una quantità compresa fra $-0°,1$ e $+0°,2$.

142. Variazione annua della temperatura. — Il processo più razionale per studiare tale variazione consisterebbe nel calcolare, mediante osservazioni fatte per una lunga serie di

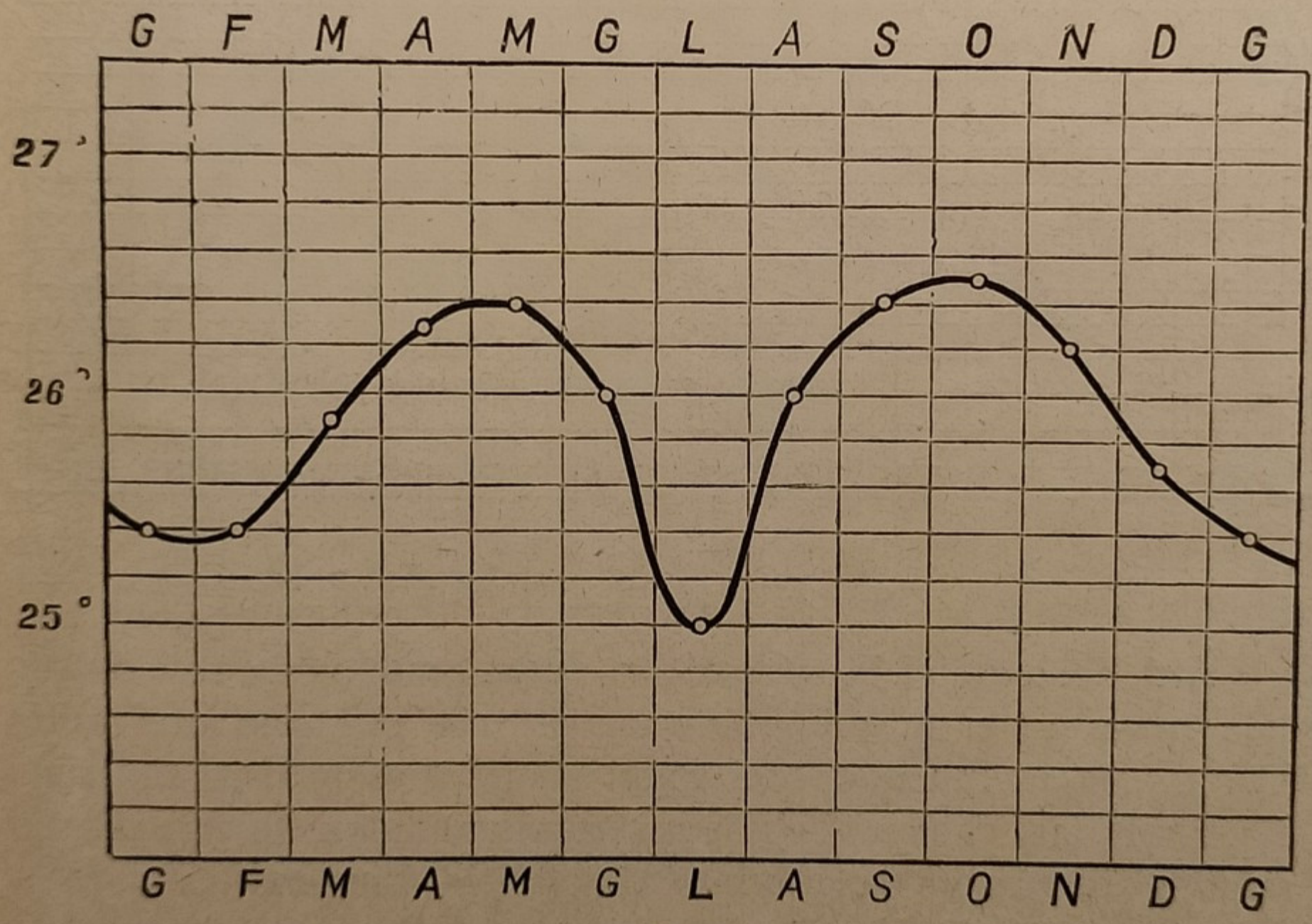

Fig. 290.

anni, la temperatura media di ciascun giorno; si otterrebbero così per ogni anno 365 medie che darebbero in tutti i suoi dettagli la variazione cercata. Tale procedimento è evidentemente laborioso, perciò ci si accontenta di paragonare fra loro temperature medie dei 12 mesi ottenute da osservazioni comprendenti almeno una ventina di anni.

Ciò facendo si riscontra che nei paesi immediatamente vicini all'equatore, l'andamento annuo della temperatura è rappresentato da una curva mostrante due massimi e due minimi. Osservisi in proposito la figura 290 relativa a Batavia (lat. 6°,8′ sud). Il fatto ha la sua spiegazione in questo che per tali luoghi il Sole passa due volte all'anno allo zenit e due volte all'anno manda i suoi raggi con il massimo angolo d'incidenza.

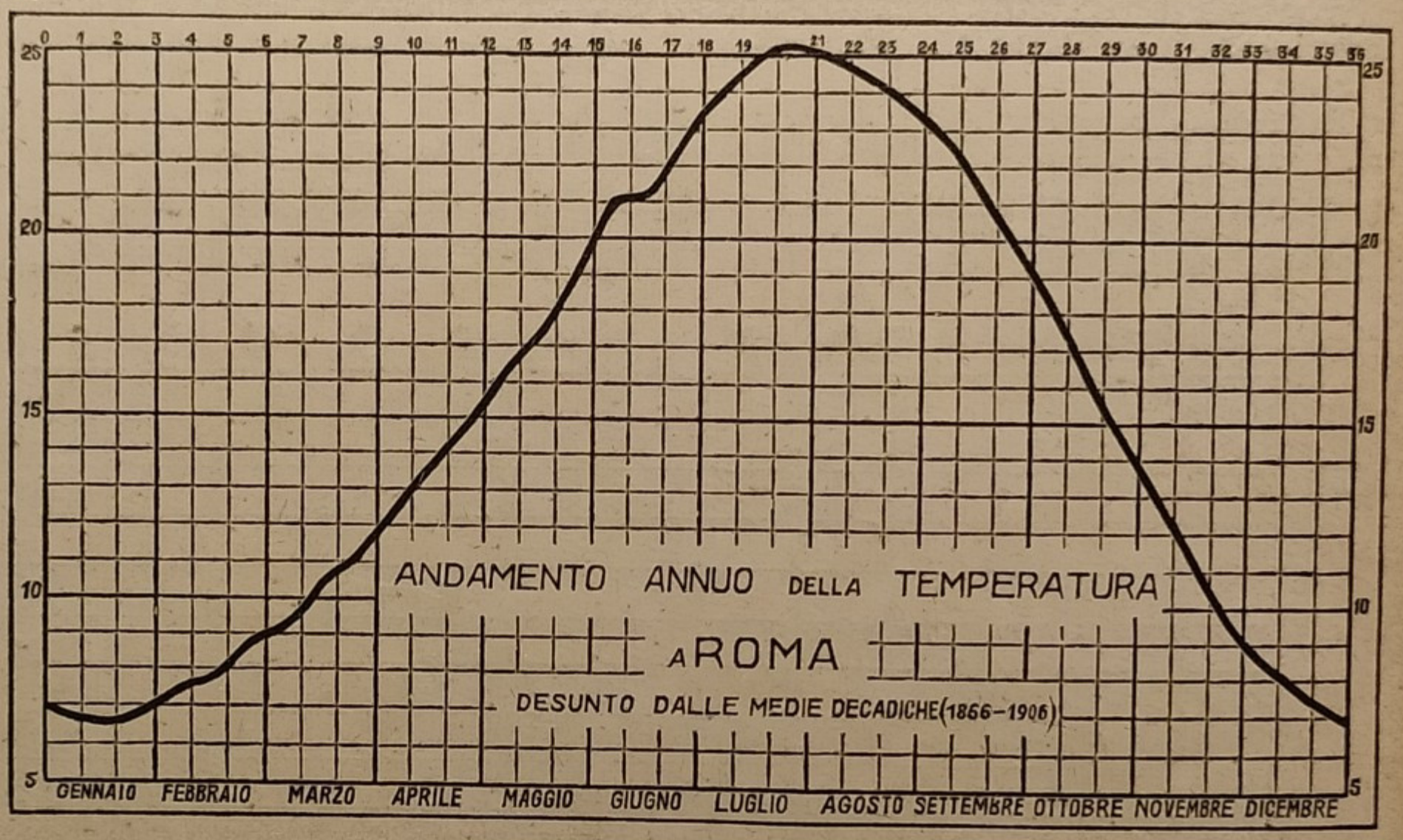

Fig. 291.

Fuori dei tropici la variazione annua non presenta che un solo massimo e un solo minimo, per ciò che solo una volta all'anno la inclinazione dei raggi solari presenta un massimo o un minimo valore; da noi un massimo valore lo presenta al solstizio d'estate e un minimo al solstizio d'inverno.

La fig. 291 dà l'andamento annuo della temperatura per Roma. Nei nostri paesi la massima temperatura annua si verifica 20 giorni circa dopo il solstizio d'estate, cioè verso la metà di luglio e la minima verso la metà di gennaio. Tali ritardi hanno la stessa origine dei ritardi che abbiamo riscontrato nella massima e nella minima temperatura diurna.

L'*escursione annua* della temperatura in un dato luogo è la differenza fra la media mensile più elevata e la media mensile

più bassa. Tale escursione varia da luogo a luogo, ed in relazione a ciò i diversi luoghi sono divisi in tre categorie:

1° — luoghi a *clima marino* o *regolare*, nei quali l'escursione annua non oltrepassa 10°;

2° — luoghi a *clima medio* o *moderato*, con escursione annua compresa tra 10° e 20°;

3° — luoghi a *clima continentale* o *eccessivo* con escursione superante i 20°.

Riferendoci all'Italia troviamo una zona nella parte centrale della Val Padana, con escursione annua molto elevata, di circa 24°. La zona si estende da Alessandria a Mantova, comprendendo Parma, Piacenza, Cremona, Vigevano, Reggio Emilia e Mirandola. In generale tutta la Valle Padana presenta un'elevata escursione annua, mentre tutto il resto d'Italia trova nell'influenza del mare un'azione moderatrice, che mitigando i calori estivi e i freddi invernali, abbassa la escursione. Tale azione è più notevole sulle coste tirreniche, che sono aperte su di un mare più ampio e meglio risentono l'influsso dei venti che vengono dal mare.

Tale influsso si estende anche nelle regioni interne: Firenze, Arezzo, Perugia, Aquila, Potenza, con escursione annua inferiore a 20°.

Piccole escursioni troviamo nelle penisole calabrese e salentina, come pure nella zona costiera della Sicilia. In quell'isola l'escursione annua cresce regolarmente procedendo verso l'interno fino a raggiungere, a Mineo, il massimo valore riscontrato nell'isola: 18°,7.

In Liguria l'escursione è bassa, soprattutto in causa delle elevate medie invernali. Questa regione deve la sua condizione privilegiata alla catena montuosa che la ripara da Nord, alla sua esposizione a mezzogiorno e ai venti del Tirreno.

Meteore acquee.

143. Nubi e nebbie. — Sono masse d'aria che portano sospese delle minute goccioline d'acqua, compatte, non a forma di vescica come si riteneva una volta, che hanno in media un diametro di 2 centesimi di millimetro. Non raramente, invece

delle goccioline d'acqua si possono trovare sospesi nell'aria minutissimi aghi di ghiaccio. È provato che per la condensazione del vapor d'acqua in goccioline occorre non solo una conveniente diminuzione di temperatura, ma anche la presenza di *nuclei di condensazione* attorno ai quali possa iniziarsi il deposito liquido. Tali nuclei possono essere i granelli del comune pulviscolo atmosferico, ma spesso sono anche dei corpuscoli, detti ioni, che incontreremo nella Elettricità, formantisi nell'aria per la presenza dell'ozono, o della *ipoazotide*. Mancando tali nuclei la condensazione non avviene. Nelle città industriali, dove i camini delle fabbriche versano nell'aria abbondantissimo fumo che è principalmente formato di minuscole particelle di carbone sfuggito alla combustione, le nebbie sono frequenti e densissime; tipiche sono a notizia di tutti le nebbie di Londra.

Non c'è differenza fra nube e nebbia; la nube è una massa d'aria, torbida per le goccioline o per gli aghetti di ghiaccio, staccata dal suolo; la nebbia invece è una massa d'aria dello stesso tipo aderente al suolo. Dalla pianura noi parliamo di nubi che avvolgono la cima dei monti; se facciamo un'ascensione fino a lassù, ci troviamo in mezzo alla nebbia.

Tanto le goccioline d'acqua che i piccoli aghi di ghiaccio sospesi, avendo una densità molto superiore a quella dell'aria, scendono in modo continuo, ma data la resistenza relativamente grande che l'aria oppone alla loro discesa, questa si effettua assai lentamente; le goccioline d'acqua possono raggiungere la velocità massima di mezzo metro al secondo e i cristallini di ghiaccio anche meno. Per attraversare una nube di un km. di spessore le goccioline impiegherebbero quasi mezz'ora. Ma man mano che delle goccioline scendono altre se ne formano, ciò che determina la *rigenerazione della nube*.

La frequenza della nebbia in Italia va diminuendo da nord a sud; è fortissima in Val padana ed è massima nelle provincie di Parma, Modena, Bologna, Mantova e Pavia; mentre è quasi nulla lungo le coste sicule e quelle di Reggio di Calabria. È scarsissima lungo la riviera tirrenica, ionica e nel basso Adriatico; più abbondante lungo il medio Adriatico; considerevole nell'alto Adriatico.

144. Varie forme di nubi. — Le nubi possono presentare diversissime forme ed aspetti, ma per facilitarne la designazione sono state divise in un certo numero di tipi con nomi speciali.

I tipi principali sono quattro:

a) *Cirri*, nubi a filamenti;

b) *Cumuli*, arrotondate o a sfera;

c) *Strati*, distese in strati uniformi;

d) *Nembi*, nubi nere, confuse, dalle quali cade la pioggia.

Fig. 292.

Fig. 293.

Usando questi nomi da soli o combinati due a due si possono designare tutte le nubi; si hanno così 10 denominazioni.

1. — I *cirri* sono nubi alte, di un bianco uniforme, senza ombre, in forme di filamenti isolati (fig. 292) o in striscie parallele (fig. 293), analoghe a quelle che si vedono sulla sabbia delle spiaggie dopo il ritiro dell'acqua.

2. — I *cirro-strati* sono anche nubi superiori, presentantisi come un velo biancastro, che conferisce al cielo un aspetto

lattiginoso. La figura 294 mostra un gran velo di cirro-strati al disopra di nubi temporalesche.

I cirri e i cirro-strati non sono formati da goccioline di acqua, ma da piccoli cristalli di ghiaccio. Il passaggio attraverso ad essi dei raggi del Sole o della Luna produce spesso dei fenomeni caratteristici detti *aloni*, mentre le nubi

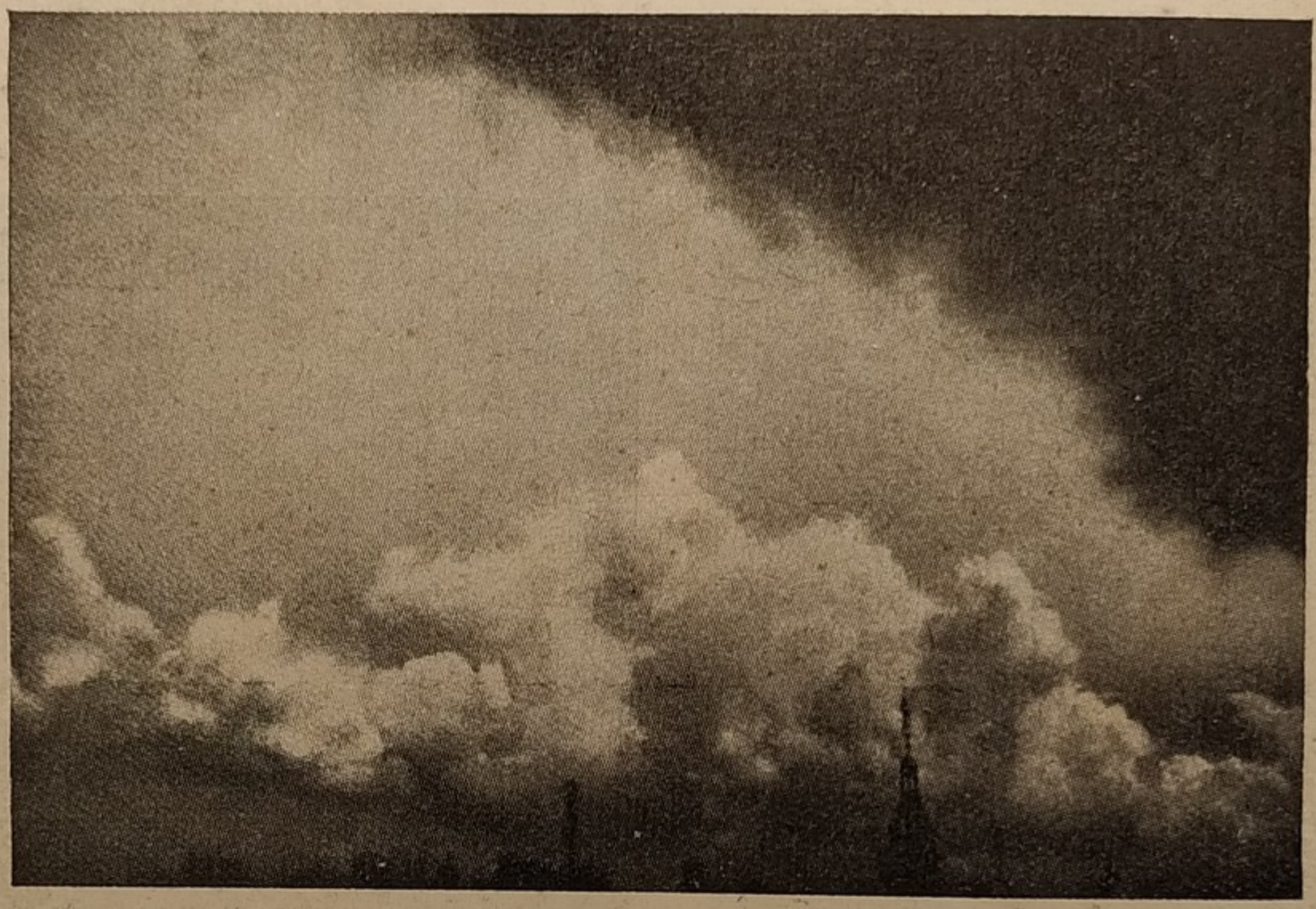

Fig. 294.

formate di sole goccioline d'acqua dànno solo delle semplici corone colorate che circondano da vicino il Sole o la Luna.

3. — I *cirro-cumuli* (fig. 295) dànno al cielo quel caratteristico aspetto detto *cielo a pecorelle*. Sono piccole palle o piccoli fiocchi bianchi senz'ombra, disposti in gruppi e spesso in file.

4. — Gli *alto-cumuli* sono gruppi di nubi a palle più grosse dei precedenti, bianche o grigiastre, e presentano delle ombre, per cui si distinguono dai cirro-cumuli. Ai margini del gruppo si osservano generalmente dei fiocchi più fini rassomiglianti ai cirro-cumuli (fig. 296).

5. — *Alto-strati*. Formano un velo denso di color grigio o bluastro, che mostra nella direzione del Sole o della Luna

una parte più brillante, senza tuttavia offrire anelli colorati od aloni, ed è per questo carattere che si distinguono dai cirro-strati, oltre che per l'altezza a cui si formano, che è metà di quella dei cirro-strati.

Le nubi 3, 4, 5 si dicono anche *nubi intermediarie*.

Fig. 295.

Fig. 296.

6. — *Strato-cumuli*. Si presentano in grosse palle o rotoli di nubi oscure che sovente e sovrattutto d'inverno coprono il cielo, dandogli un aspetto ondulato; qualche volta sono assai poco spessi, sì da scorgere l'azzurro del cielo tra i loro intervalli.

7. — *Nembi*. Nubi scure, grigie o nere, senza forma netta a margini frastagliati. Son dette nubi da pioggia, perchè da esse cade di solito la pioggia o la neve persistente.

Strato-cumuli e nembi sono anche detti *nubi inferiori*.

8. — *Cumuli*. Nubi a forte spessore, con estremità a cupola guarnita di protuberanze, mentre la base è quasi oriz-

zontale. Sono sempre nettamente limitate e dànno origine a begli aspetti di luce. Quando sono illuminati sul davanti, le protuberanze sono più brillanti nel mezzo che ai margini; se passano davanti al Sole appariscono scuri con margini brillanti e spesso abbaglianti. Si formano di solito al mattino in estate in palle arrotondate e hanno origine dalle correnti di aria ascendenti, il vapor d'acqua delle quali si condensa in seguito

Fig. 297.

al raffreddamento dovuto all'espansione dell'aria (fig. 297). I cumuli che si formano durante il cattivo tempo sono più complicati.

9. — *Cumulo-nembi*. Sono grandi ammassi di nubi elevantisi in forma di montagne o di torri e che possono esistere da soli (fig. 298) o sono accompagnati da un velo di cirro-strati. Essi sono, come i nembi, nubi da pioggia, ma più spesso nubi temporalesche che dànno pioggia di breve durata, mentre i veri nembi portano pioggie persistenti. Le nubi che dànno la grandine sono sempre cumulo-nembi.

10. — *Strati*. Sono uniformemente grigi, a forma confusa, che non dànno pioggia. Appariscono come una coltre più o meno compatta di alcune centinaia di metri e si vedono spesso correre sui fianchi delle montagne, e sono propriamente delle nebbie che non scendono fino al suolo.

Fig. 298.

Per il Meteorologo è importante distinguere le varie specie di nubi, poichè la presenza dell'una o dell'altra specie può spesso dare delle utili indicazioni per la previsione del tempo.

I Bollettini meteorologici che giornalmente vengono dall'apposito Ufficio Presagi di Roma pubblicati portano fra le altre indicazioni anche quella della *nebulosità*. Il *grado di nebulosità* è la frazione di cielo coperta, ed è espresso in decimi. Ad es., nebulosità 10 significa cielo tutto coperto; nebulosità 3, per 3 decimi, ecc.

In Italia si verifica che l'alto e il medio versante Adriatico hanno una nebulosità media maggiore di quella che si verifica nelle corrispondenti località del versante tirrenico: la Liguria particolarmente si distingue per una nebulosità molto scarsa della riviera di ponente, quasi identica a quella che si verifica nelle località marittime meridionali.

Cifre elevate raggiunge la nebulosità lungo la dorsale appenninica, le Alpi e la maggior parte della Val Padana.

145. Pioggia. — Le goccioline d'acqua delle nubi ingrossandosi per un'ulteriore condensazione, o per essersi riunite fra di loro, scendono con velocità maggiore, e se riescono a raggiungere il suolo senza evaporare, si ha la *pioggia*.

La misura della pioggia caduta è fatta coi *pluviometri*. Il primo concetto di tal misura e il primo strumento atto ad eseguirla furono esposti dal Castelli discepolo di Galileo (1639). La misura della pioggia si fa in *millimetri*, indicando lo spessore che l'acqua raggiungerebbe cadendo sopra un suolo orizzontale impermeabile.

Il pluviometro è un recipiente di forma variabile sormontato da un imbuto terminante con un orlo circolare e sottile, in modo che il cerchio che esso limita abbia una superficie determinata in modo preciso. In certi tipi il cerchio descritto ha il diametro di 356,1 mm., cioè un'area di 1000 cm². Così avviene che ad ogni litro d'acqua raccolta corrispondono 10 mm. di pioggia.

Il pluviometro va posto in luogo aperto, non troppo esposto al vento, lontano da alberi e da muri di alti fabbricati, ed a m. 1 o a m. 1,50 da terra.

La *frequenza della pioggia* in una data regione viene di solito indicata dal *numero di giorni piovosi*, e presso il Servizio Idrografico Italiano è detto giorno piovoso quello in cui si verifica un minimo di pioggia di un mm.

Il totale annuo dei giorni con precipitazioni (pioggia o neve) va dai massimi 158 a Camaldoli, 145 Valli del Pasubio, 138 a Vallombrosa, ai minimi di 59 a Sanremo e Gallipoli, 55 ad Otranto. Secondo l'Angot il minimo per l'Europa si verifica ad Astrakan con 60 e il massimo a Valentia nell'estremo sud-ovest dell'Irlanda con 246 giorni all'anno. Ma non v'è stretta relazione fra la frequenza e l'altezza della pioggia.

La zona equatoriale in tutta la sua estensione ha un'altezza di pioggia molto elevata, che può raggiungere e talora oltrepassare i 4000 mm. all'anno; in certe località sono stati oltrepassati i 5000 mm. Poco fuori dei tropici, fra i 20° e 30° di latitudine, si hanno località in cui l'altezza della pioggia è minima e sulle coste occidentali dell'Africa, dell'America del Sud e dell'Australia, estesissime regioni comprese fra le latitudini indicate hanno un'altezza di pioggia inferiore a 200 mm. all'anno.

In Italia l'altezza della pioggia raggiunge i massimi a Montemaggiore con 3312 mm. annui, a Monte Nevoso con 3148, a Caporetto con 2626, a Camaldoli con 1822, a Como con 1655, a La Spezia con 1468, ad Avellino con 1248.

Di fronte a tali massimi abbiamo i minimi seguenti: Cagliari con 484, Girgenti con 513, Bari con 589, Potenza con 657.

Avuto riguardo alla distribuzione delle pioggie nell'anno, le osservazioni mostrano che nell'Italia settentrionale e in quasi tutta l'Italia centrale si hanno due massimi annuali, in ottobre e in maggio, e due minimi in luglio o agosto e in gennaio o febbraio. La Sicilia e le regioni costiere della Penisola Salentina e della Calabria hanno un solo massimo e un solo minimo annuale.

146. Neve e grandine. — Sono precipitazioni dell'acqua atmosferica allo stato solido. Esaminata la neve al microscopio, appariscono delle stellette semplici o raggiate o insieme combinate; oppure dei fiocchi costituiti da stellette o da aghi prismatici o a piramide, o anche da semplici aghi prismatici o piramidali.

La neve si accumula sul suolo formando un *manto nevoso*, che è cattivo conduttore del calore perchè il ghiaccio è di per sè cattivo conduttore, ma più ancora per l'aria che tiene imprigionata. Il manto nevoso protegge perciò il suolo da un ulteriore raffreddamento, di guisa che tra l'aria esterna e il terreno che sta sotto la neve può esistere una notevole differenza di temperatura. In tal senso va inteso il detto che la neve è la *lana dei campi*.

La neve è misurata dall'altezza equivalente di acqua allo stato liquido; basta perciò raccoglierla in un comune pluviometro e farla fondere.

Per certi scopi, particolarmente oggi agli scopi degli sports invernali molto diffusi, si misura anche lo spessore della neve, misura però difficile e incerta, poichè su di essa il vento che la sposta facilmente ha notevole influenza.

La neve fonde quando cadendo attraversa degli strati atmosferici a temperatura notevolmente superiore a 0°, sicchè non si mostrerà nei paesi dove la temperatura si mantiene sempre elevata.

In Europa può nevicare dappertutto senza eccezione, sebbene la neve sia molto rara nelle regioni più meridionali della Spagna, dell'Italia e della Grecia. Anche sulle coste africane a Tunisi e ad Algeri la neve in media fa la sua apparizione

una volta ogni due anni. Ciò vale solo per le regioni in pianura, perchè anche sulle montagne africane la neve cade frequente. E si capisce anche che sulle montagne la neve possa permanere tutto l'anno; si ha così il *limite delle nevi perpetue*, che logicamente sarà più elevato nei paesi caldi.

In Italia la *nevosità* maggiore si ha nell'alta Valle Padana, lungo le falde delle Alpi e il versante settentrionale dell'Appennino centrale con prevalenza verso il lato orientale. È bassissima in Liguria, assai bassa nel Lazio e nella Campania.

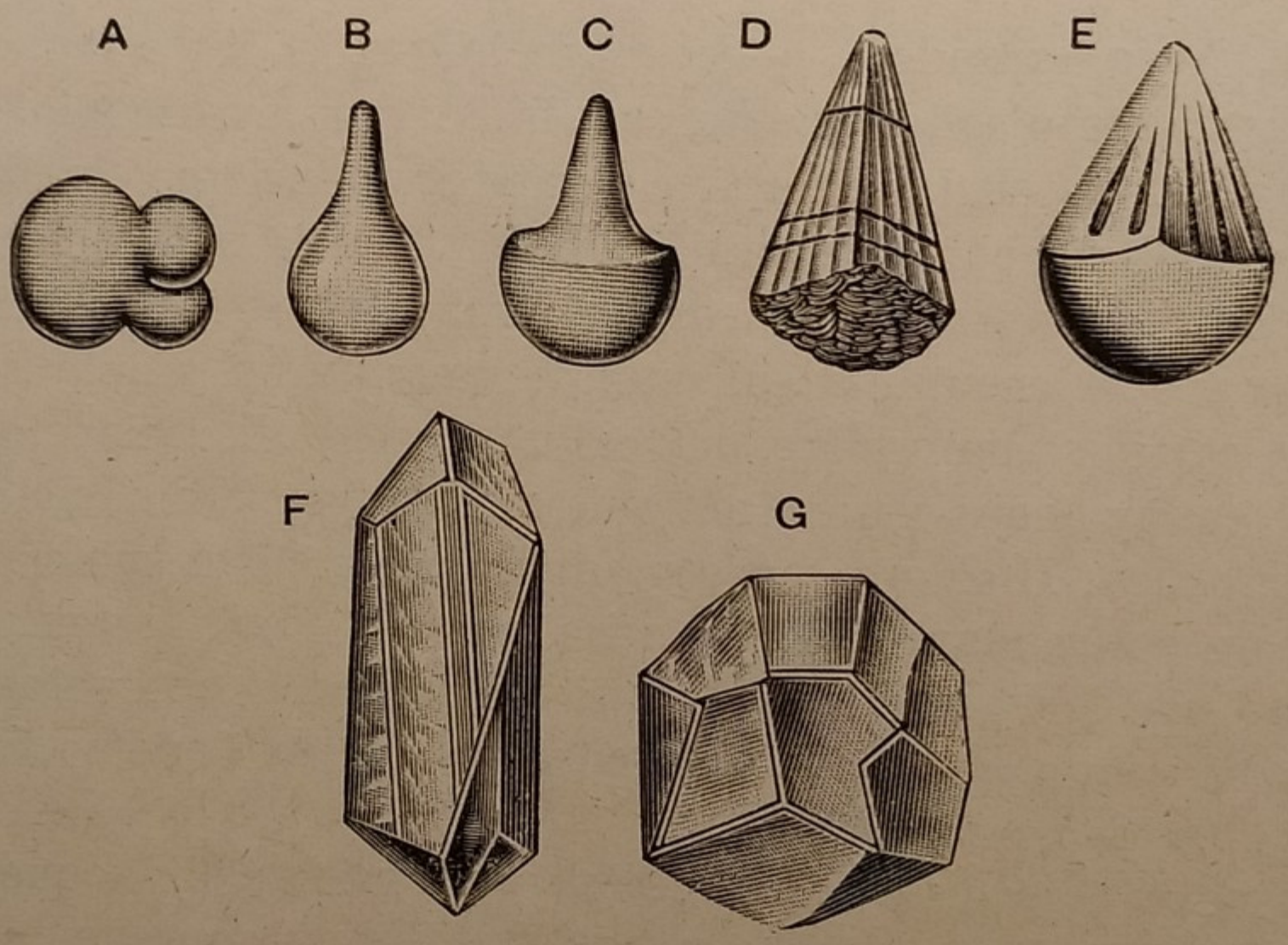

Fig. 299.

La *grandine* si forma quando il passaggio dallo stato di vapore o di liquido allo stato solido è molto rapido.

I chicchi di grandine hanno dimensioni assai diverse, essendo il loro diametro compreso fra 0,5 mm. e 2 cm.; ma talora queste dimensioni vengono di molto superate. La loro forma è variabilissima (fig. 299). La struttura dei chicchi è costituita di un nucleo centrale opaco e friabile, circondato da uno strato spesso di ghiaccio compatto e bianco, e attorno a questo da strati alternati di ghiaccio trasparente e opaco. I chicchi più grossi possono essere ricoperti da uno strato di cristalli trasparenti di ghiaccio assai regolari (fig. 300).

L'alternarsi degli strati di ghiaccio trasparente ed opaco, mostra che i chicchi, prima di arrivare a terra, hanno dovuto attraversare degli strati atmosferici in condizione diversa e soggiornare per qualche tempo nella regione delle nubi. La grandine accompagna spesso i temporali, ma le azioni elettriche invocate spesso per spiegare la sospensione dei chicchi nell'atmosfera pare non abbiano alcuna influenza nel fenomeno.

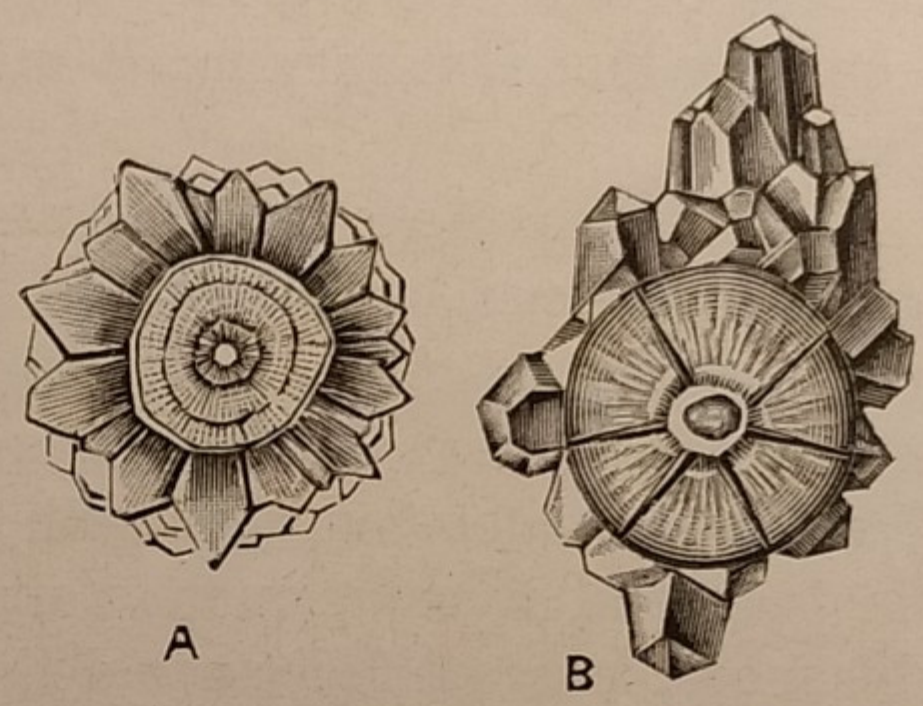

Fig. 300.

147. Rugiada e brina. — Alla mattina, verso il levar del Sole, dopo una notte calma e serena, si vedono sovente l'erba e le foglie basse degli alberi ricoperte di finissime goccie d'acqua. Il fenomeno si presenta tutte le volte che la temperatura dei corpi esposti all'irradiamento notturno si abbassa al di sotto del punto di saturazione dell'aria ambiente, senza che l'aria stessa scenda a tale temperatura. La mancanza di nubi favorendo l'irradiamento notturno, la rugiada si verifica nelle notti serene.

Un forte vento ostacola il formarsi della rugiada, perchè porta via l'aria, che sta a contatto dei corpi irradianti, troppo rapidamente perchè la temperatura abbia tempo di scendere al punto di saturazione.

La rugiada è rara d'inverno per la scarsezza del vapor d'acqua contenuto nell'aria e per la debole variazione diurna della temperatura; invece è più frequente d'estate per le opposte ragioni.

La rugiada è molto utile alla vegetazione: in certi paesi asciutti, dove non piove quasi mai, una parte dell'acqua necessaria alla vita delle piante è fornita dalla rugiada.

La *brina*, che vediamo frequentemente ad autunno avanzato, d'inverno e spesso anche a primavera coprire come un bianco lenzuolo l'erba dei campi, si ritiene originata dal congelarsi del deposito liquido, ossia della rugiada, per causa di un'ulteriore diminuzione di temperatura.

La pressione atmosferica.

148. Pressione atmosferica. — Che cosa sia la pressione atmosferica e come sieno costituiti gli apparecchi — *barometri* — che servono a misurarla, è stato detto ampiamente in altro luogo.

La nozione delle indicazioni del barometro è di capitale importanza per la Meteorologia, e soprattutto importante è il conoscere le altezze barometriche sincrone in luoghi diversi, distribuiti sopra una larga zona della superficie terrestre. Però per rendere confrontabili le letture del barometro fatte in luoghi a diversa quota (altezza) e a diverse temperature bisogna portare alle letture delle correzioni; bisogna cioè, come si dice, *ridurre a zero* e *al livello del mare* la pressione indicata dal barometro.

149. Riduzione del barometro a zero. — Riguardo a questa correzione è facile intendere che due barometri, che si trovano a temperatura diversa, dànno della *stessa* pressione indicazioni *diverse*. Pensiamo infatti che uno dei barometri sia a 0° e l'altro a $t°$, ambedue soggetti alla stessa pressione. L'altezza barometrica letta su quello a $t°$ sia H, cioè la colonna di mercurio di questo barometro occupi H divisioni della scala metrica annessa all'apparecchio. Anzitutto osserviamo che le divisioni della scala sono millimetri esatti a 0°, ma a $t°$, — per effetto della dilatazione del regolo, che è ordinariamente di ottone, sul quale è tracciata la scala —, ogni divisione è lunga $(1 + kt)$ mm., essendo k il coefficiente di dilatazione lineare del regolo (73); dimodochè l'altezza del mercurio nella canna è $H(1 + kt)$ mm. Oltre a ciò va notato che il mercurio del barometro, trovandosi alla temperatura di $t°$, ha una densità D_t diversa dalla densità D_o a 0° (75). È noto che tra D_t e D_o esiste la relazione:

$$D_o = D_t\,(1 + \alpha t) \qquad (1)$$

dove α è il coefficiente di dilatazione cubica del mercurio.

Per conseguenza se il mercurio del barometro s'immagina portato a 0°, con che la sua densità passerebbe da D_t a D_o, il mercurio occuperebbe nella canna un'altezza x tale da far equilibrio alla stessa pressione, alla quale, a $t°$, fa equilibrio con l'altezza $H(1 + kt)$. Con queste premesse, possiamo esprimere in due modi la pressione atmosferica o con $H(1 + kt)D_t$, o con xD_o; da cui l'equazione:

$$xD_o = H(1 + kt)D_t . \qquad (2)$$

Questa, sostituendo a D_o il valore dato dalla (1), diviene:

$$xD_t(1 + \alpha t) = H(1 + kt)D_t$$

che risolta dà:

$$x = H\frac{1 + kt}{1 + \alpha t} . \qquad (3)$$

Con facile procedimento algebrico si ottiene approssimativamente:

$$x = H(1 + kt - \alpha t)$$

o meglio:

$$x = H[1 - (\alpha - k)t] .$$

Or essendo il coefficiente di dilatazione cubica del mercurio $\alpha = 180 \times 16^{-6}$ (76), e quello lineare dell'ottone $k = 18 \times 10^{-6}$ (73):

$$\alpha - k = 162 \times 10^{-6}, \text{ per cui:}$$

$$x = H(1 - 162 \times 10^{-6}t)$$

ossia:

$$x = H - 162 \times 10^{-6}tH.$$

Il termine correttivo è dunque $162 \times 10^{-6}tH$.

La lettura barometrica a scopo meteorologico si fa con l'approssimazione di 1 decimo di millimetro, di guisa che la correzione s'impone quando la lettura vien fatta a una temperatura diversa da zero, per la quale il termine correttivo acquista il valore di 1 decimo di millimetro. Or essendo H, in luoghi non molto alti, eguale a circa 760, è facile calcolare che la correzione s'impone anche quando la temperatura è $+ 1°$ o $- 1°$.

150. Riduzione del barometro al livello del mare. — La pressione barometrica varia rapidamente coll'altezza (50); di modo che per paragonare fra loro le letture fatte su due barometri in due luoghi vicini che si trovano a diversa altezza, bisogna tener conto dell'influenza dell'altitudine e ricondurre così le letture fatte a quelle che si avrebbero se i due barometri fossero alla stessa altezza. Come piano di riferimento è stato convenuto di prendere il livello del mare.

La correzione riesce facile usando delle apposite formole, che qui non vengono riportate, o facendo uso delle Tavole altimetriche (50). Esemplifichiamo: sia $756^{mm},1$ l'altezza, ridotta a 0°, di un barometro trovantesi all'altitudine di 150 m. sul mare, e $750^{mm},4$, anche ridotta a 0°, quella di un altro barometro trovantesi in un luogo vicino, all'altitudine di 300 m. Dalle Tavole citate si trova che un barometro portato dal mare a 100 m. scende di $9^{mm},5$; portato da 100 a 200 m. scende di $9^{mm},4$ e da 200 a 300 m. di $9^{mm},3$. Per conseguenza se il primo barometro lo si portasse da 150 m. al mare, l'altezza da esso segnata aumenterebbe di $\frac{1}{2} \times 9,4 = 4^{mm},7$ per il primo abbassamento di 50 m., e in seguito di $\mathbf{9^{mm},5}$ per il successivo abbassamento di 100 m., in totale di $4,7 + 9,5 = 14^{mm},2$; perciò la sua indicazione al mare sarebbe di $156,1 + 14,2 = 770^{mm},3$; è questa l'altezza del primo barometro *ridotta al livello del mare.*

Il secondo barometro portato da 300 a 200 m., da 200 a 100 m. da 100 m. al mare mostrerebbe nella sua indicazione un aumento di $9,3 + 9,4 + 9,5 = 28^{mm},2$; perciò la sua altezza *ridotta al mare* è di $750,4 + 28,2 = 778^{mm},6$.

Movimenti dell'atmosfera.

151. Venti. — Nell'atmosfera si verificano movimenti in tutte le direzioni ed in tutti i sensi, ma i più importanti sono quelli orizzontali. Ed è appunto col nome di *vento* che si designa una corrente d'aria orizzontale o poco inclinata, purchè parallela al suolo.

La *direzione* del vento è data da quella parte della rosa dei venti da cui esso proviene; così vento di nord vuol dire vento

che viene da nord e che soffia da nord verso sud. Tale direzione può, senza particolari strumenti, desumersi dal fumo dei camini o da una striscia lunga e leggera di stoffa fissata ad una estremità. Ma meglio viene indicata da apposite banderuole metalliche, dette *anemoscopi*, girevoli attorno a un asse verticale che passa per il loro centro di gravità.

La *forza* o *intensità* del vento è indicata dalla velocità o dalla pressione che esercita sugli oggetti. La velocità del vento è la velocità con cui si muove un palloncino in equilibrio aerostatico in balìa del vento; viene espressa in metri al secondo, e talora anche in chilometri all'ora. *Anemometri* son chiamati gli apparecchi con cui si misura la velocità del vento.

I Meteorologi indicano spesso la forza del vento riferendosi a una scala che va da 0 a 6:

0 = calma (0-4)	3 = quasi forte (29-43)
1 = debole (4-14)	4 = forte (43-61)
2 = moderato (14-29)	5 = tempesta (61-83)

6 = uragano (oltre 83)

I numeri fra parentesi indicano le velocità corrispondenti in km. orari.

In certi casi eccezionali si hanno velocità estremamente grandi: il 29 settembre 1925 la *bora* a Trieste soffiò con una media diurna di 73,5 km. all'ora, raggiungendo un massimo di 91 km. A Venezia (Lido) una raffica raggiunse il 23 luglio 1927 i 150 km. orari. In questi casi il vento trasporta tegole, abbatte camini, divelle e trasporta alberi.

152. Cause dei venti. — Se la temperatura dell'aria e dell'atmosfera fosse dappertutto la stessa, non ci sarebbe ragione che l'aria si muovesse da una regione all'altra e il vento non esisterebbe. La causa del vento va ricercata nelle differenze di temperatura che si manifestano alla superficie della Terra e nell'aria. Se infatti A e B sono due regioni della superficie terrestre a diversa temperatura, e per fissare le idee A sia più calda di B, la colonna d'aria calda sovrastante ad A acquista per la sua diminuita densità un movimento ascendente e quindi alla base della colonna che sta sopra B si veri-

fica una pressione superiore a quella che ha la base della colonna che sta sopra A e per conseguenza si verifica rasente terra un movimento d'aria, ossia un vento, da B verso A.

Tale vento avrà evidentemente una velocità tanto maggiore quanto maggiore è la differenza di pressione, che per una data distanza, si verifica fra B ed A.

153. Circolazione generale dell'atmosfera: alisei e controalisei. — Il Sole resta compreso, nel suo moto apparente annuo intorno alla Terra, fra i tropici, per conseguenza le temperature più elevate si manifestano nella zona intertropicale e quindi in queste regioni l'aria avrà di preferenza un movimento ascendente che portando in tali regioni una diminuzione di pressione sarà causa di un movimento dell'aria incombente sul suolo dai due emisferi verso l'equatore; cioè di venti procedenti lungo i meridiani verso la zona torrida. Ma la rotazione della Terra, che, come è noto, si verifica da ovest ad est, modifica la direzione di tali venti deviandoli verso ovest, cosicchè la direzione di tali venti è di nord-est nell'emisfero boreale anzichè di nord, e di sud-est anzichè di sud nell'emisfero australe. Questi venti regolari e costanti sono stati chiamati *alisei*, da un'antica parola francese *alis*, che significa *unito*, *regolare*.

La massa d'aria che sale verticalmente sopra l'equatore, arrivata a una certa altezza, si divide in due correnti rivolte teoricamente l'una verso il polo nord l'altra verso il polo sud, ma in realtà tali venti deviano verso est e costituiscono i *controalisei*.

Gli alisei hanno la massima parte nella circolazione generale dell'atmosfera, poichè coprono una zona della superficie terrestre che si estende per oltre 30° a nord e a sud dell'equatore e quindi coprono da soli più della metà della superficie della Terra.

Verso l'equatore dove gli alisei dei due emisferi s'incontrano, per la elisione del loro moto, l'aria non ha un movimento orizzontale; si hanno quivi le così dette *calme equatoriali*, che, per ragioni che non esponiamo, risultano alquanto spostate verso nord dell'equatore in misura maggiore d'estate che d'inverno.

Per completare quest'argomento aggiungeremo che al centro dell'Atlantico nord, in estate, gli alisei hanno in media la velocità da 6 a 7 metri al secondo.

154. Monsoni. — I continenti, quando ci si allontana un poco dall'equatore, sono d'inverno a parità di latitudine più freddi degli oceani, e la differenza di temperatura cresce colla latitudine; d'estate si verifica il contrario. I grandi continenti si comportano quindi d'inverno come centri di freddo e d'estate come centri di caldo. Se quindi non esistessero gli alisei si avrebbero dei venti stagionali procedenti, d'inverno, dai continenti verso gli oceani e d'estate dagli oceani verso i continenti. Ma le differenze di temperatura fra l'inverno e l'estate non sono tanto forti perchè queste cause locali di inversione si sovrappongono alla circolazione generale dell'atmosfera, e quindi le correnti generali saranno solamente deviate dalla loro direzione media e rinforzate o indebolite secondochè tale direzione media avrà lo stesso senso o senso contrario dei venti stagionali. Ma se le variazioni di temperatura sono assai grandi, i venti stagionali possono divenire più intensi dei venti permanenti della circolazione generale, e così in tali regioni può avvenire la inversione completa del regime dei venti fra l'inverno e l'estate. È ciò che avviene per il grande continente asiatico.

L'Asia d'inverno presenta delle temperature estremamente basse in relazione alla sua latitudine, in modo che in tutto il nord-est dell'Asia si ha una pressione media che, ridotta al mare, supera i 776 mm. Così d'inverno si ha sull'Asia un regime *anticiclonico*, cioè di alta pressione, per effetto di una grande corrente che dalle alte regioni atmosferiche discende e che, giunta in basso, irradia tutt'intorno dalla terra verso il mare. In modo particolare sulla costa meridionale della Cina, nel golfo di Bengala e il Mare delle Indie, a nord dell'equatore, si ha d'inverno un forte vento di nord-est; è questo il *monsone di nord-est*.

D'estate, al contrario, l'Asia presenta una temperatura assai elevata e conseguentemente una pressione piuttosto bassa: in luglio, a nord-est dell'India, la pressione scende a 748 mm.

Per conseguenza in questa stagione l'Asia presenta un regime *ciclonico*, ossia di bassa pressione, e si producono dei venti che da tutte le parti affluiscono verso il centro dell'Asia; si ha così il *monsone di sud-est*, che è più forte del monsone invernale di nord-est per il fatto che d'estate la differenza di temperatura che esiste tra la terra e il mare è superiore che d'inverno.

155. Venti periodici: brezze. — Il diverso riscaldamento che si manifesta fra due regioni contigue, dà luogo a certi venti che spirano di giorno in un senso e di notte in senso contrario, sempre dalla regione più fredda verso la più calda. Vicino alla costa, di giorno, scaldandosi la terra più dell'acqua, si forma una corrente diretta dal mare verso la terra; è questa la *brezza di mare*. Di sera e durante la notte la terra, per il maggior irradiamento, si raffredda più del mare, e per conseguenza si verifica un vento in senso inverso: *la brezza di terra*. Le brezze sono però venti deboli da 2 a 6 m. al secondo. Alla mattina e al tramonto si hanno delle brevi soste quando si verifica l'inversione del senso della corrente d'aria.

156. Isobare - Ciclone ed anticiclone - Gradiente barometrico. — Alla Meteorologia importa soprattutto di conoscere i valori che i diversi elementi meteorici, pressione atmosferica, umidità, stato del cielo, venti ecc., hanno allo stesso istante in diversi punti della superficie terrestre. Il telegrafo ordinario prima e poi la radio resero possibile l'attuazione di un tal servizio ed è così che ora una grande rete di Osservatorî sparsi su tutta Europa, e fuori, si scambiano, si può dire, in modo continuo, durante la giornata i risultati delle loro osservazioni.

In Italia il compito spetta all'*Ufficio Presagi* di Roma, riunito con R. Decreto Legge 2 luglio 1925 alla Sezione Aerologica della Direzione Superiore del Genio e delle Costruzioni Aeronautiche. A tale ufficio alle 8,30 del mattino si cominciano a ricevere i meteoradî esteri, mentre giungono per telegrafo ordinario le osservazioni eseguite alle 8 nelle varie stazioni della rete italiana. Apposito personale decifra i dispacci man mano che arrivano e i cartografi ne trascrivono i dati sulla carta con segni convenzionali. Poco dopo le 11 tutto il mate-

riale è pronto, in modo che verso le 12,30 viene emesso il Presagio, che è normalmente dichiarato valido per le 24 ore successive.

Fra gli elementi meteorici il più importante è la pressione e all'Ufficio Presagi vengono su carte geografiche tracciate le *isobare*, cioè le linee che uniscono i diversi luoghi che allo stesso istante hanno la stessa pressione ridotta a 0° e al livello del mare.

Tali carte mostrano spesso alcune figure caratteristiche formate da isobare chiuse, come è mostrato nelle due figure 301 e 302 alle pagine seguenti.

Una figura a linee chiuse dicesi *ciclone* se la pressione diminuisce dall'esterno verso l'interno, *anticiclone* se la pressione diminuisce in senso contrario. La configurazione delle isobare varia da un giorno all'altro ed è soprattutto su tali modificazioni che la Meteorologia trae argomento per formulare i suoi giornalieri presagi. Alla distribuzione delle isobare sono legati in particolar modo i venti, perchè l'aria è sempre sollecitata a muoversi dai punti di maggior pressione a quelli di pressione inferiore. Si dice *gradiente barometrico* la differenza di pressione fra due punti situati all'unità di distanza e presi sulla stessa normale alle isobare che passano per i detti punti. Così si dice che il gradiente tra due punti presi nelle condizioni specificate, è 1, 2, 3... quando la pressione diminuisce di 1, 2, 3... millimetri passando dall'uno all'altro punto, essendo tali punti a 111 km. di distanza. È questa l'unità di distanza adottata nel caso attuale.

L'osservazione mostra che i venti deboli corrispondono a gradienti inferiori a 1 e che per gradienti di 4 o 5 il vento soffia a tempesta.

Per concludere noteremo che di solito al ciclone corrisponde tempo cattivo e all'anticiclone tempo buono.

157. Previsione del tempo. — Dicevamo che lo scopo ultimo della Meteorologia è la previsione del tempo; ma è d'uopo intenderci sul significato di tal frase. Allo stato attuale delle cose la Meteorologia dall'esame dei vari elementi meteorici desunti con osservazioni sincrone in molti luoghi della superficie ter-

Straordinario ciclone nel Mare Tirreno del 23 Gennaio 1915.

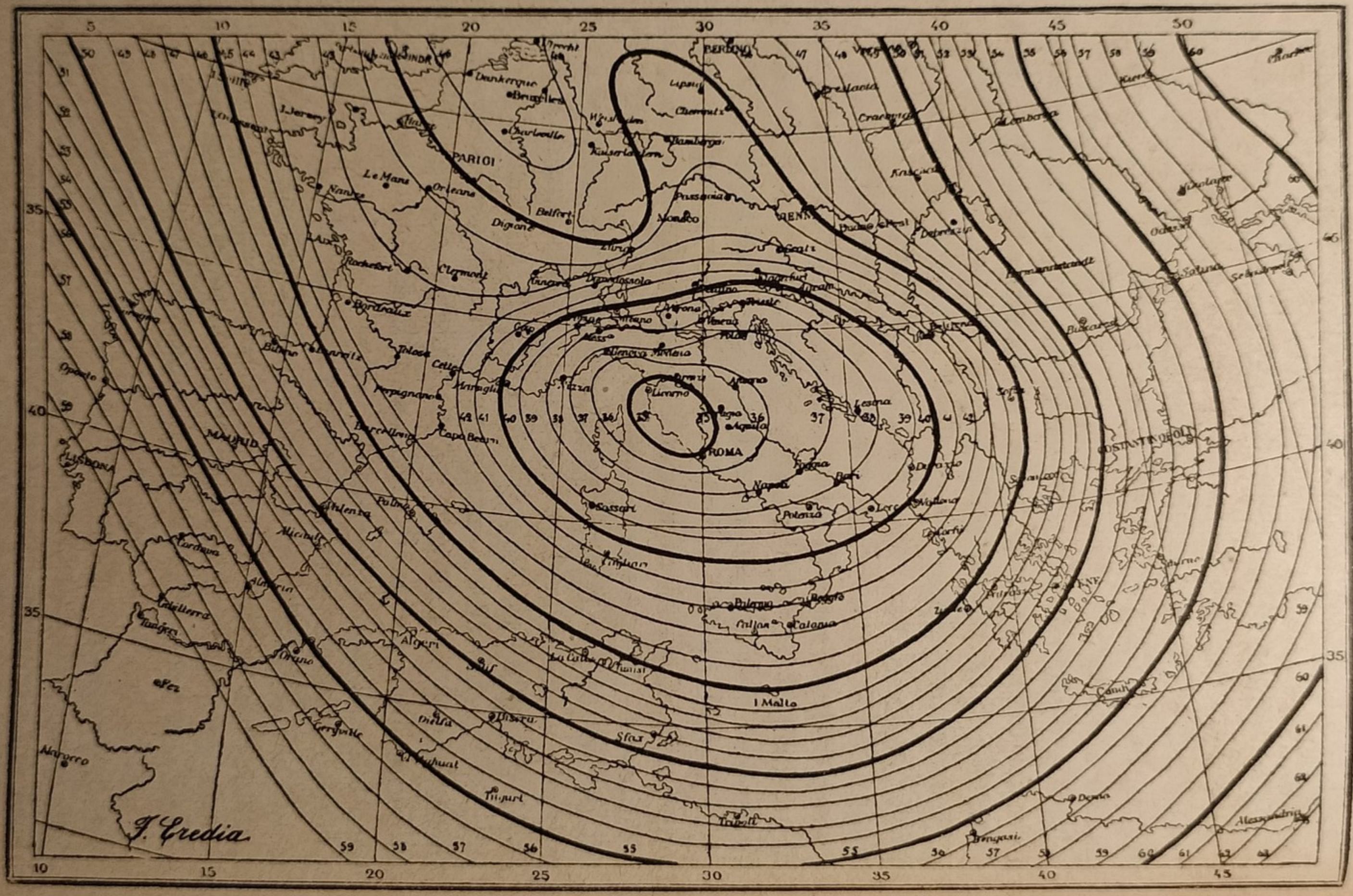

Fig. 301.

anticiclone del 24 Gennaio 1907.

Straordinario ciclone nel Mare Tirreno del 23 Gennaio 1915.

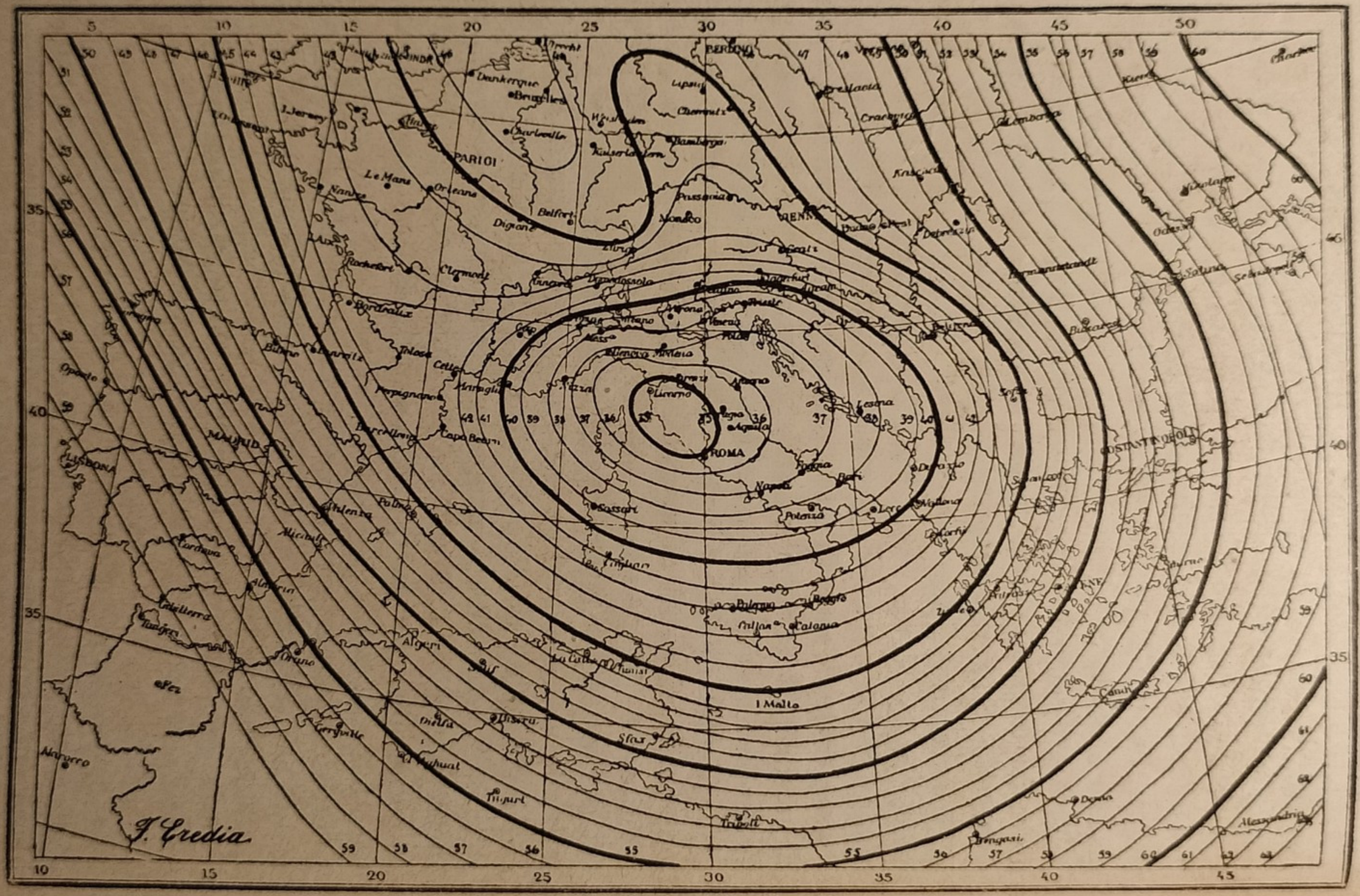

Fig. 301.

anticiclone del 24 Gennaio 1907.

Straordinario anticiclone del 24 Gennaio 1907.

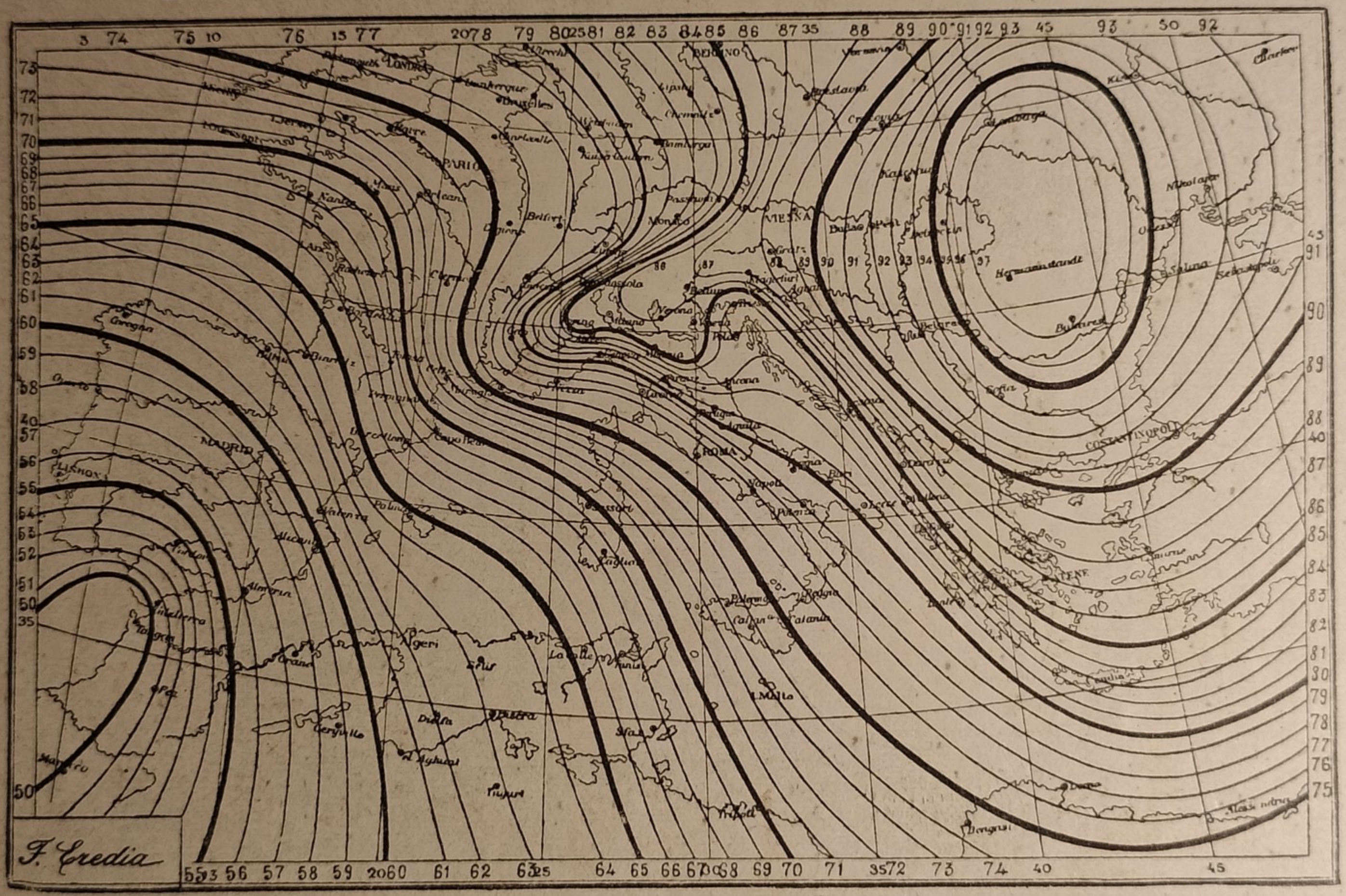

Fig. 302.

Straordinario anticiclone del 24 Gennaio 1907.

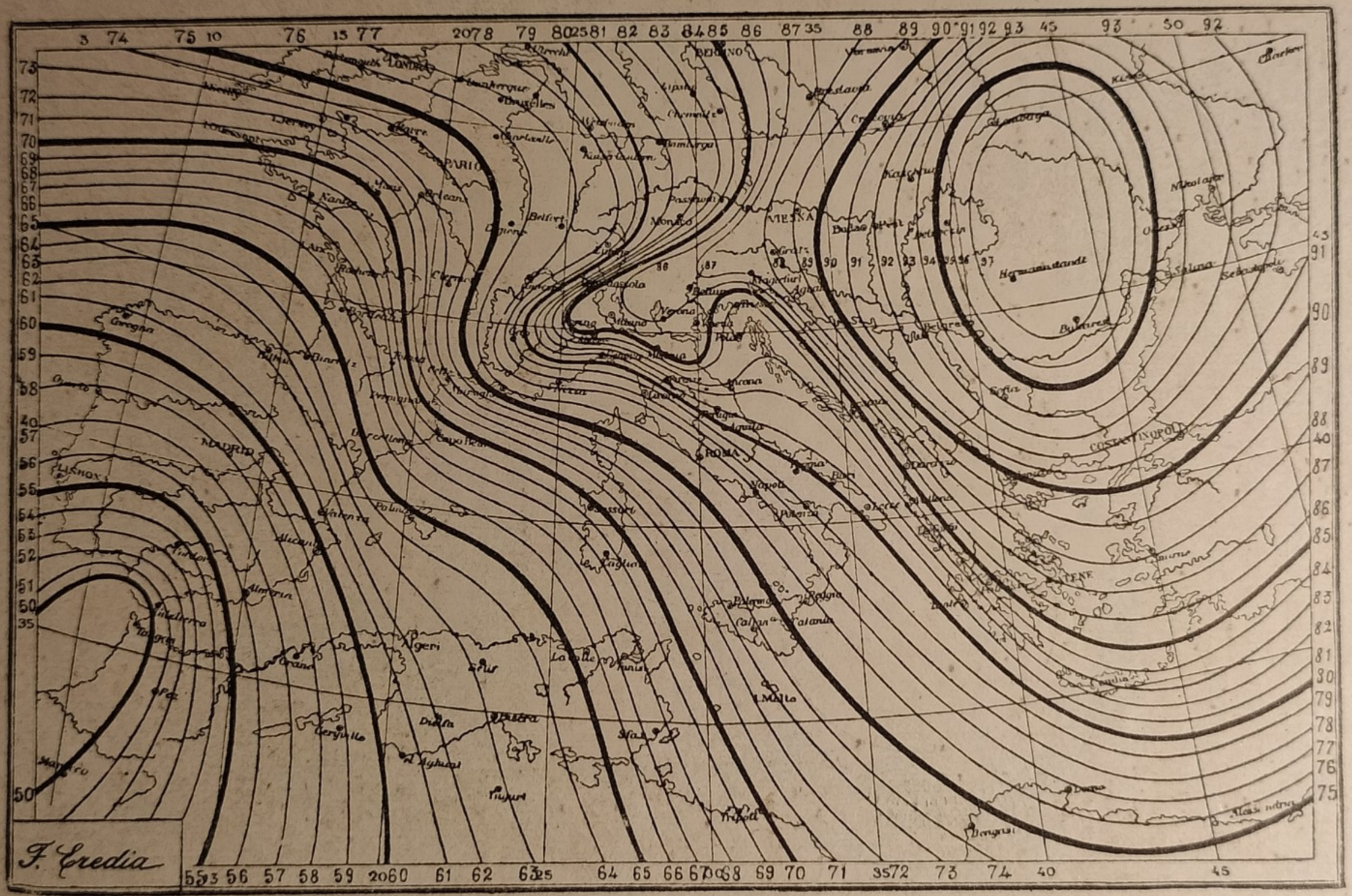

Fig. 302.

restre, aspira solo a formolare un presagio del tempo con un anticipo di uno o due giorni. Troppo poco note sono ancora le leggi che regolano i fenomeni atmosferici per poter fare di più.

Non è però chi non conosca che, anche ridotte a tale modesto limite, le previsioni meteoriche hanno oggi una enorme importanza per l'agricoltura, per la navigazione colle navi, e in special modo per la navigazione aerea.

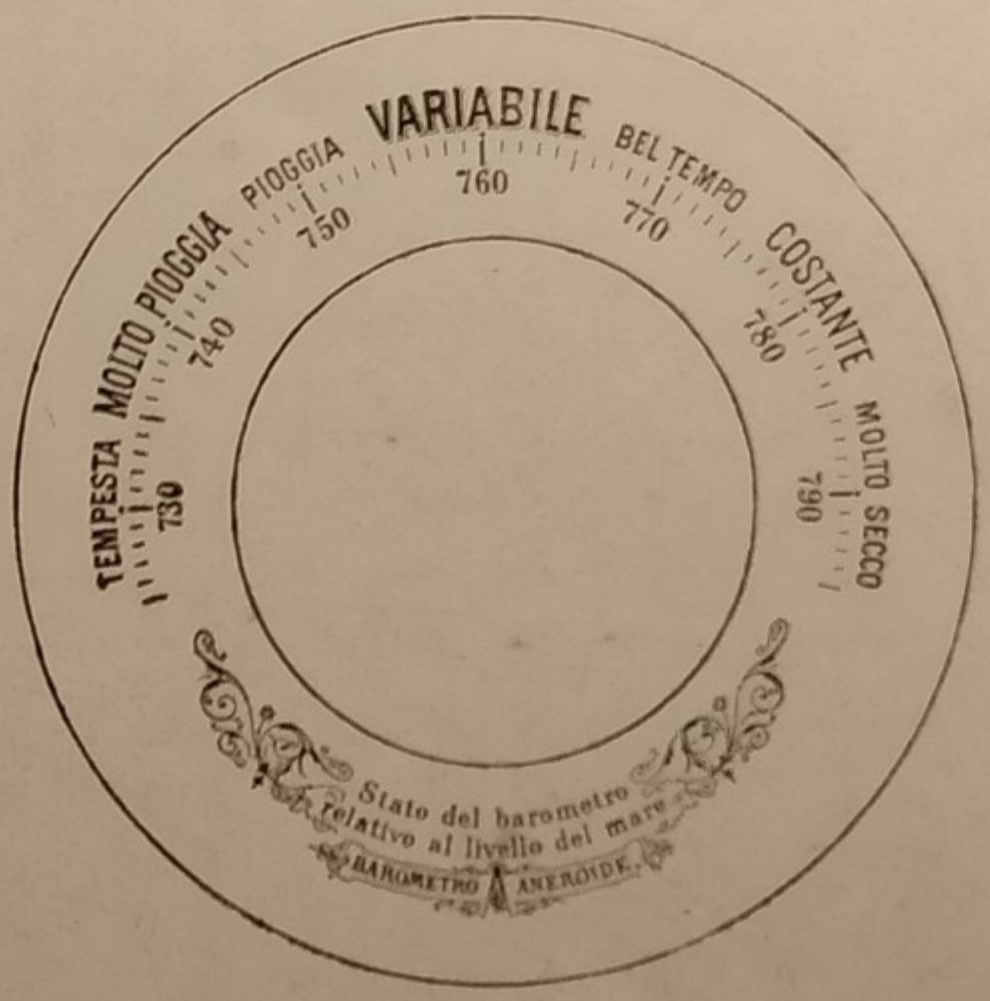

Fig. 303.

E si comprende quindi come sia illusorio pretendere di fare una previsione fondata sulle sole indicazioni che ci fornisce il barometro che abbiamo in casa.

Spesso però, specialmente nelle pianure dell'Europa occidentale, come da noi nella Valle del Po, anche il nostro barometro può darci qualche utile indicazione. Di solito il tempo si mette al bello se il barometro sale lentamente e gradualmente; mentre una discesa graduale è indice di prossimo tempo cattivo. L'abbassamento del barometro risulta rapido all'avvicinarsi di una burrasca.

In ordine a tali fatti, spesso sul quadrante del barometro, oltre la graduazione della pressione, si trova una leggenda con le parole: *variabile*, *bel tempo*, *costante*, ecc., nel senso delle pressioni crescenti; *pioggia*, *molta pioggia*, *tempesta* nel senso opposto (fig. 303).

Delle principali meteore luminose ed elettriche verrà detto nell'Ottica e nella Elettricità.

ACUSTICA

158. Vibrazione dei corpi elastici. — Si prenda una verga elastica, per esempio di acciaio, e la si fissi nel suo estremo inferiore C (fig. 304). Se si piega la sbarra, portando l'estremo libero in D', e la si abbandona, le sue parti tendono a ritornare nella posizione di riposo per effetto delle forze elastiche, che sono, almeno per deformazioni non troppo grandi, proporzionali alle deformazioni stesse. Ma in virtù dell'inerzia le diverse parti della sbarra raggiunta la posizione di riposo la oltrepassano in modo che l'estremo libero si porta in un punto D''; di qui torna indietro raggiungendo quasi la posizione D'. In seguito il fenomeno continua, risultandone delle *oscillazioni* di ampiezza più o meno rapidamente decrescente, ma sensibilmente *isocrone* come quelle del pendolo, cioè hanno una durata indipendente dalla loro ampiezza, purchè tale ampiezza non sia troppo grande.

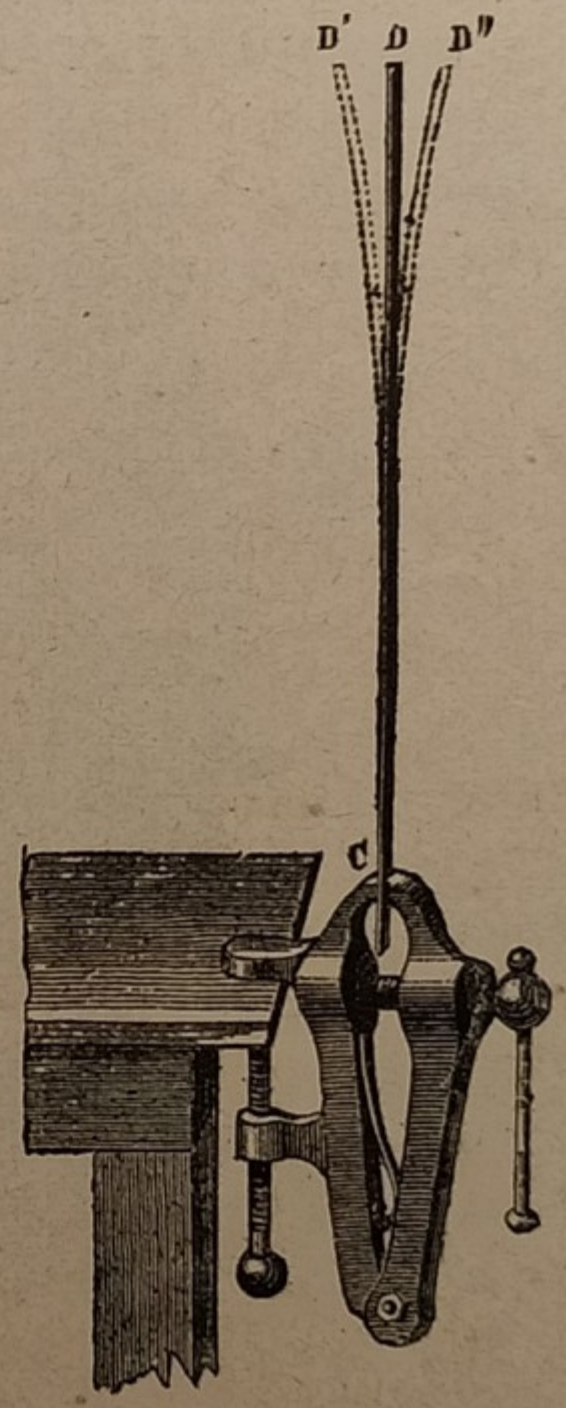

Fig. 304.

Queste oscillazioni sono in genere molto rapide, specialmente per verghe corte e di discrete dimensioni trasverse, poichè in tal caso le forze motrici sono molto grandi e piccola la massa in movimento. Oscillazioni di tal genere, che si dicono più spesso *vibrazioni*, possono generare un suono.

Anzi è provato che qualunque suono ha origine da vibrazioni di corpi. Una verga di acciaio come quella descritta, lunga una

quindicina di centimetri, di sezione rettangolare con dimensioni di 5 a 10 mm., messa in vibrazione, produce un suono nettamente musicale.

Una corda da violino, eccitata da un archetto, entra in vibrazione assumendo l'aspetto di un fuso e dà un suono (fig. 305).

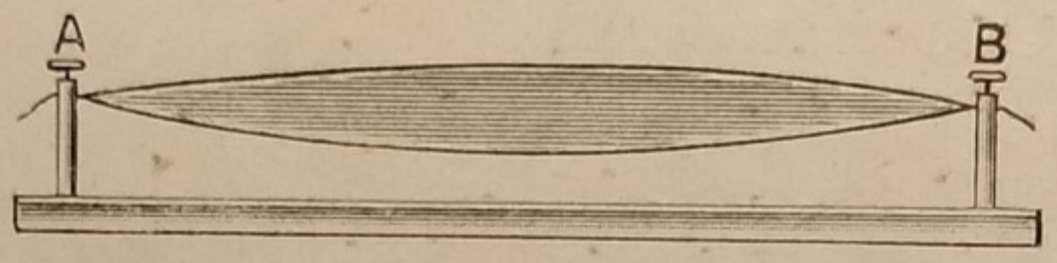

Fig. 305.

Una serie di rapidi colpi, battuti, a mo' d'esempio, con un dito sopra un tavolo, sono dall'orecchio percepiti distinti l'un dall'altro; ma se si producono con maggior rapidità, per un fenomeno auditivo analogo alla persistenza delle immagini visive sulla retina, non vengono percepiti staccati, ma si ha una sensazione continua, cioè un suono di carattere musicale. Ciò è provato dalla seguente esperienza. Sopra un motorino

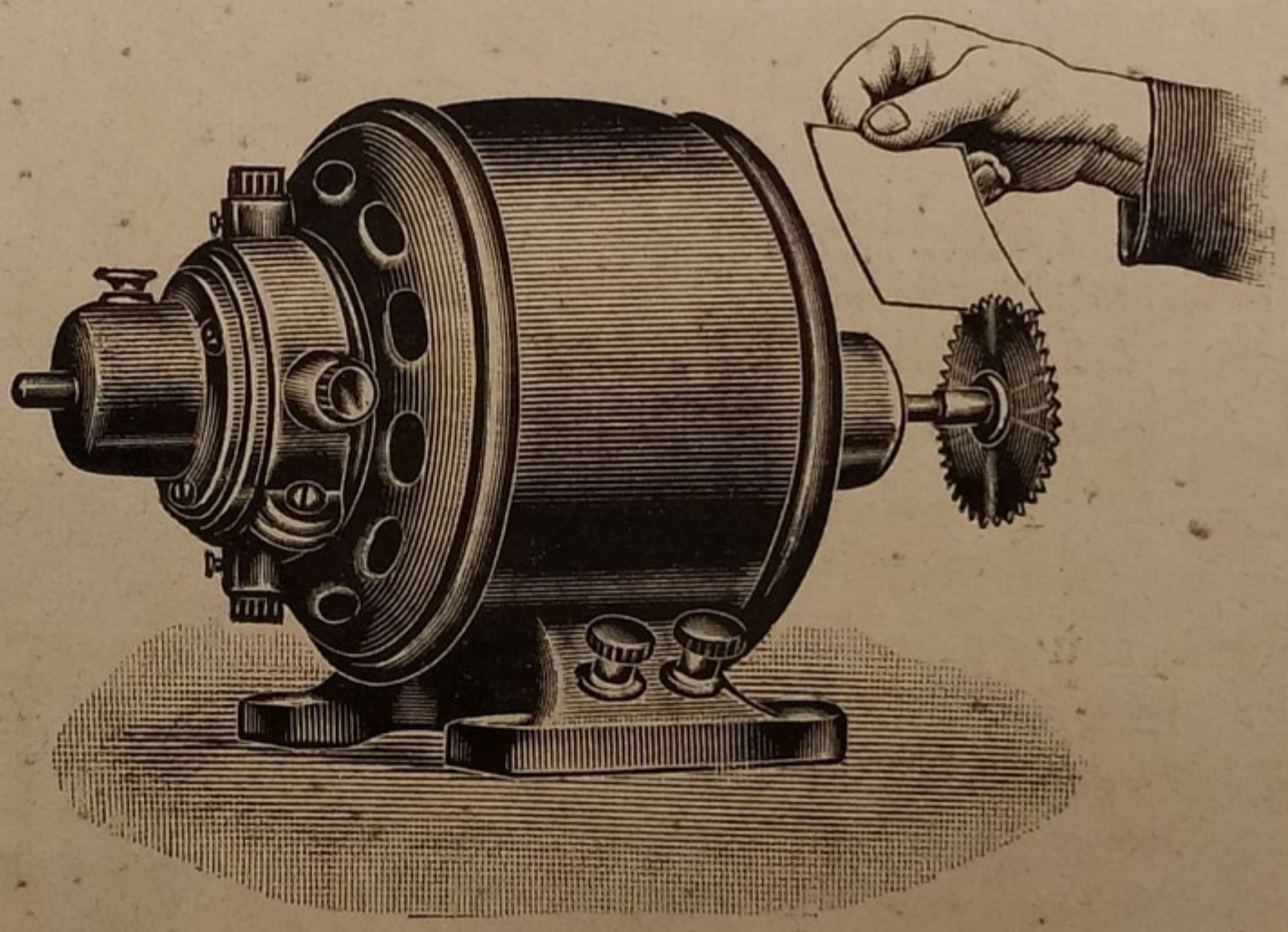

Fig. 306.

elettrico — in mancanza di questo si può usare un motore a mano qualunque, come ad esempio la macchina della forza centrifuga — è montata una ruota dentata, che vien messa in moto piuttosto rapido e contro i denti si appoggia il bordo di una carta da visita (fig. 306). Così il cartoncino sollevato da un dente, non appena è libero va a battere contro il dente suc-

cessivo producendo un piccolo rumore. Se la ruota gira piuttosto lentamente, l'orecchio percepisce staccati i successivi colpi, ma se la velocità cresce si ha una sensazione continua, ossia un vero suono di carattere musicale.

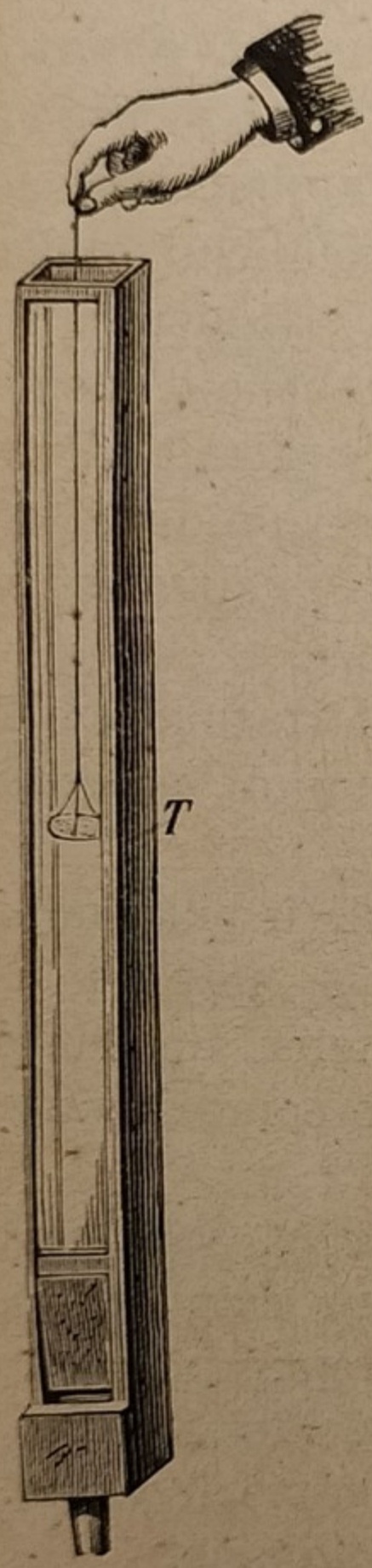

Fig. 307.

Non soltanto i corpi solidi ma anche i liquidi e i gas, vibranti, dànno un suono. Così se in un tubo sonoro T, che abbia una parete di vetro (fig. 307), introduciamo, sospendendolo a un filo, un dischetto di carta velina, teso entro un cerchietto e cosparso di granelli di sabbia, vediamo questi saltellare vivamente quando il tubo dà un suono, mostrando che l'aria vibra nel tubo.

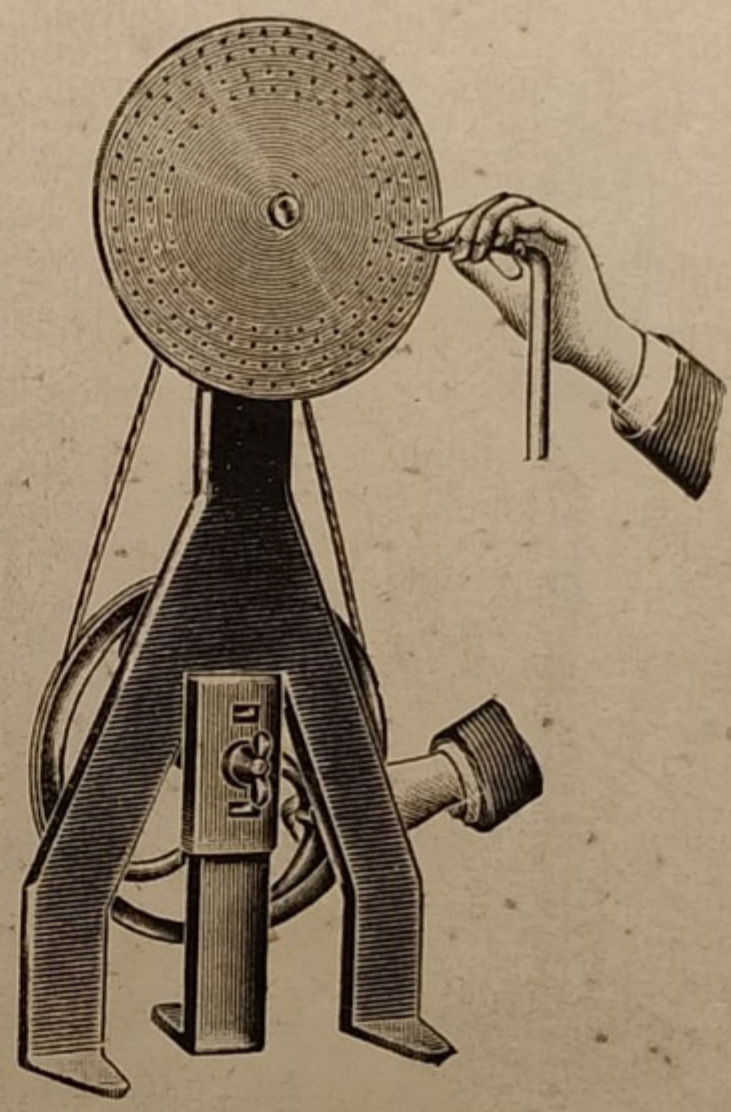

Fig. 308.

Anche un getto d'aria periodicamente interrotto è capace di produrre un suono; per provarlo basta far girare un disco di cartone o di latta, portante verso la periferia una o più corone di fori equidistanti e dirigere un getto d'aria contro una delle dette corone mediante un tubo affilato (fig. 308). Nell'istante in cui l'orifizio del tubo corrisponde a un foro l'aria lo attraversa e spinge via l'aria che sta dall'altra parte; subito dopo, il getto d'aria viene intercettato dal tratto pieno del disco che sta fra due fori successivi; l'aria posteriore, per effetto della sua elasticità, torna indietro e questo doppio movimento, ripetendosi ad intervalli molto vicini, produce ancora un suono. L'apparecchio è detto *sirena*.

159. Propagazione dei moti vibratori - Velocità di trasmissione. — Le vibrazioni di un corpo sonoro non possono però impressionare l'orecchio se non gli vengono *trasmesse per opera di un mezzo elastico*, in mancanza del quale l'orecchio non sente.

L'*aria* trasmette le vibrazioni vibrando essa stessa; lo si dimostra tendendo una membrana sottile ed elastica *M* entro un anello verticale, lungo la quale è sospeso un leggero pendolino *a* che vi poggia contro (fig. 309). Posto l'apparecchio ad una certa distanza da un campanello che squilla, si scorge il pendolino rimbalzare vivamente.

Fig. 309.

I *corpi solidi duri* trasmettono bene il suono; un orecchio appoggiato contro l'estremità di un tavolo sente benissimo il rumore prodotto da un'unghia che si fa strisciare contro l'altra estremità, o dal tic-tac di un orologio.

Anche i *liquidi* son capaci di trasmettere il suono. Un palombaro ode i rumori prodotti nell'acqua o alla superficie.

I corpi solidi *non elastici*, quali il piumino, i tappeti, i materassi, non vibrano e *spengono il suono*. Abbiamo anche qui insomma dei corpi *trasparenti* ed *opachi* per il suono come avviene per la luce.

Il suono non si *propaga nel vuoto*. Sotto una campana pneumatica si pone un campanello, poggiandolo sopra un cuscinetto di ovatta. Mettendo in azione il campanello, finchè c'è aria nella campana si ode il suono, ma non si ode affatto nulla quando venga fatto il vuoto. Il suono riprende se si fa rientrare l'aria nella campana.

I rumori in alta montagna, quali un colpo di fucile e la voce stessa, risultano assai deboli per causa della rarefazione dell'aria.

La propagazione in tutti i casi non è istantanea; infatti si nota che durante un temporale passa un certo tempo fra l'apparizione del lampo e la percezione del tuono. L'intervallo di tempo che separa i due fenomeni misura il tempo impiegato dal suono a percorrere la distanza fra i due punti, giacchè si può ritenere come affatto nullo il tempo impiegato dalla luce a percorrere la distanza stessa.

Le prime misure precise della velocità del suono nell'aria furono eseguite nel 1738 da una Commissione dell'Accademia delle Scienze francese fra Montlhéry e Montmartre; si trovò una velocità di 337 metri al secondo.

Queste esperienze vennero riprese nel 1822 dall'Ufficio delle Longitudini fra Montlhéry e Villejuif, e dettero 340 metri al secondo alla temperatura di 15°.

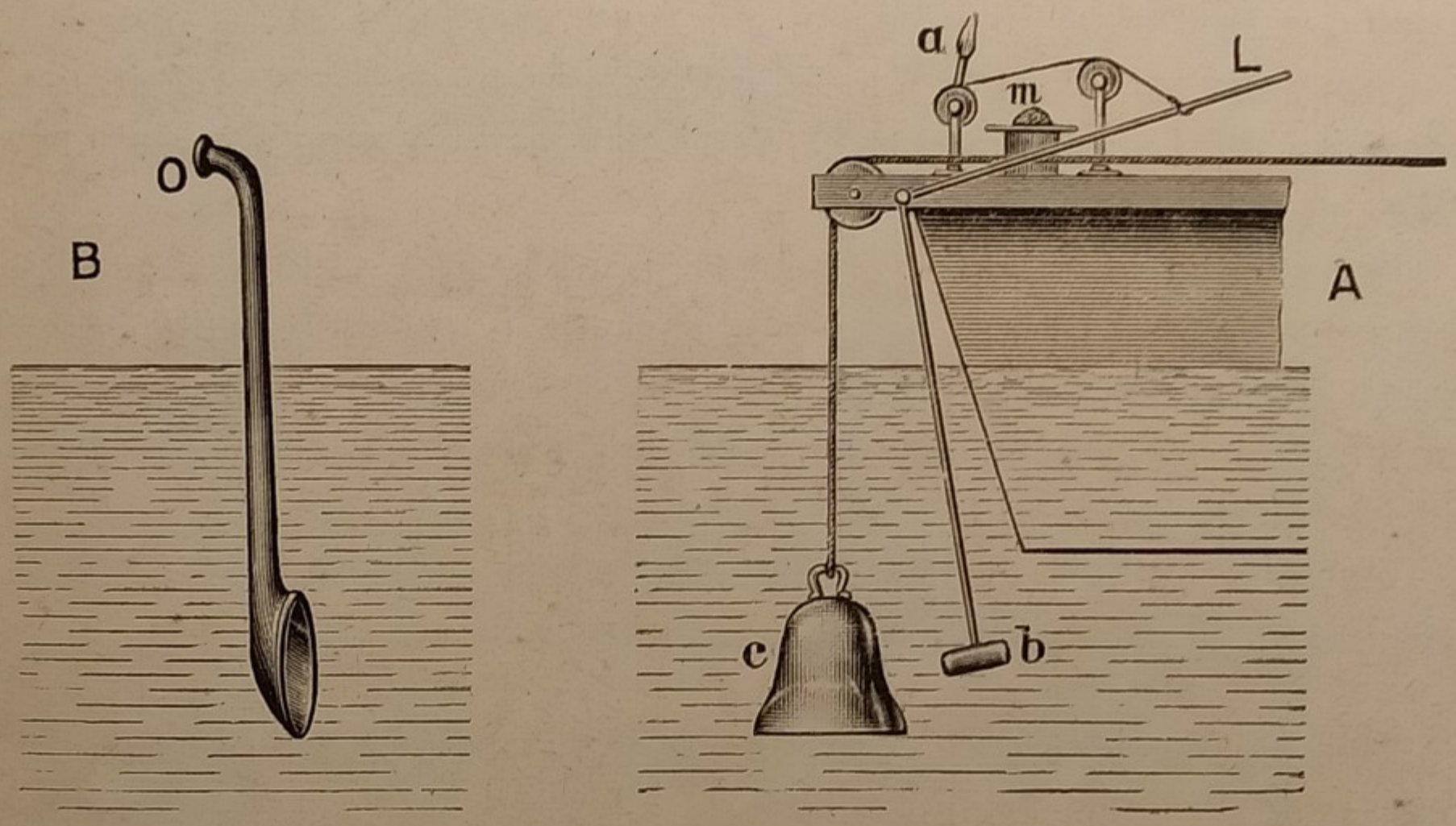

Fig. 310.

Altre esperienze fatte in seguito, utilizzando tutte le risorse della Fisica, hanno dato dei risultati leggermente diversi, sicchè si può ritenere che *la velocità nell'aria a 0° sia di 333 metri al secondo.*

In un gas *di densità* d *rispetto all'aria*, la velocità a *t°*, è:

$$333^{m}\sqrt{\frac{1+0{,}00365\,t}{d}}$$

Nel 1827 Colladon e Sturm hanno misurato la velocità del suono nell'acqua del lago di Ginevra, fra due battelli ancorati alla distanza di circa 13 chilometri (fig. 310). Alla stazione *A* era sospesa una campana immersa nell'acqua, e ad un certo momento, colla pressione contro una leva *L* veniva battuto un colpo contro la campana, mentre una miccia *a* accesa si

abbassava ed accendeva una massa di polvere *m*, nel momento preciso in cui il colpo veniva prodotto. All'altra stazione *B* era immerso nell'acqua una specie di cornetto acustico, la cui apertura maggiore, disposta in piano verticale e rivolta verso la campana, era chiusa da una membrana tesa; l'estremità superiore *o* del cornetto veniva introdotto nell'orecchio dell'osservatore. Il tempo che decorreva fra l'apparizione del lampo e la percezione del suono rappresentava in tal modo il tempo impiegato dal suono a percorrere la distanza fra le due stazioni. Si trovò la velocità di 1435 metri al secondo, essendo l'acqua a 8°.

In seguito, con metodi diretti e indiretti, venne misurata la velocità in altri mezzi: nei metalli è notevolmente maggiore di quella dell'aria, da 4 — nel piombo — a 15 volte — nell'acciaio — superiore a quella dell'aria; nel legno di abete fu riscontrata oltre 17 volte maggiore.

Notiamo infine che la velocità in un dato mezzo è stata riscontrata la stessa per tutti i suoni.

160. Meccanismo di propagazione. — Quando si produce uno scuotimento in una regione qualsiasi di un mezzo elastico, lo scuotimento si comunica *successivamente* fino alle parti più lontane. Un esempio molto istruttivo, perchè cade sotto il dominio dell'occhio, si presenta gettando un sasso sulla superficie tranquilla di uno stagno. L'acqua, nella regione colpita dal sasso, compie una serie piuttosto lunga di salite e discese, di ampiezza via via decrescente, finchè la resistenza, offerta dai legami che essa ha coll'acqua circostante e sottostante, non la riduce in quiete. Nel frattempo all'intorno si forma una serie di anelli convessi e concavi alternati, di raggio crescente, dando l'illusione che l'acqua corra tutto intorno dalla regione colpita verso le sponde.

Se però sull'acqua si trova qualche pezzo di legno o di sughero lo si vedrà sollevarsi e abbassarsi, senza assumere un moto traslatorio sensibile. *Non è dunque il mezzo elastico* — l'acqua nel caso nostro — *che progredisce; progredisce soltanto il moto da particella a particella del mezzo; ogni particella non fa che oscillare entro due limiti fissi, comunicando il proprio*

moto alle particelle attigue e obbligandole a compiere lo stesso movimento.

Quando, come nel caso sopra citato, le vibrazioni delle molecole del mezzo avvengono in una direzione *perpendicolare* a quella della propagazione del movimento, le vibrazioni si dicono *trasversali*. Tali vibrazioni si ottengono ancora agitando con una mano l'estremità libera inferiore di una corda elastica, un tubo di caoutchou, ad esempio, lunga parecchi metri, fissata all'estremità superiore; e avvengono anche nello stesso modo in tutte le corde degli strumenti sonori.

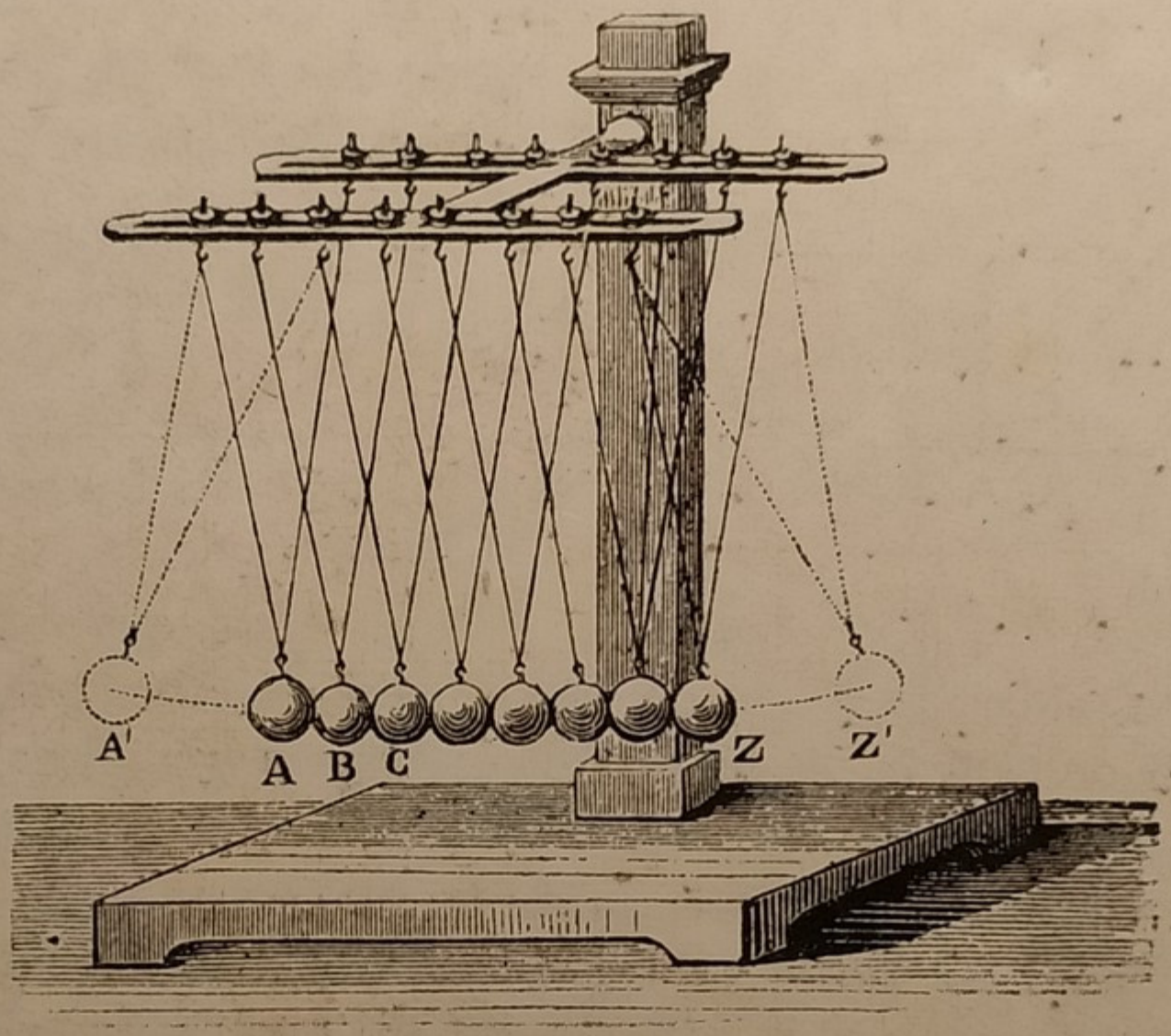

Fig. 311.

Vibrazioni longitudinali sono invece quelle che avvengono *nella stessa direzione* della propagazione del movimento. Così avvengono tutte le vibrazioni che si propagano in seno a un liquido o a un gas, come verrà più sotto chiarito. Per intendere il meccanismo delle vibrazioni longitudinali si sospendano a guisa di pendoli, mediante fili della stessa lunghezza, delle sfere d'avorio tutte eguali, scegliendo i punti di sospensione in modo che le sfere risultino a contatto l'una coll'altra (fig. 311).

Sollevata la prima sfera *A* della serie, la si lascia cadere e si osserva che essa, battendo contro la 2ª, si ferma istantaneamente e la sfera *Z*, ultima della serie, si solleva, mentre tutte le sfere intermedie rimangono quasi ferme.

La 1ª sfera, per effetto dell'urto contro la 2ª, cede a questa tutta la sua velocità, la 2ª si comporta nello stesso modo rispetto

alla 3ª e così via; è quindi logico che si muova soltanto l'ultima, che è libera. Attraverso la serie di sfere si ha quindi la propagazione di onde longitudinali, poichè ogni sfera compie un movimento che è nella direzione della propagazione.

Per accostarci sempre più al fenomeno reale della propagazione del suono in un mezzo omogeneo, consideriamo ora la propagazione dentro un tubo cilindrico, pieno d'aria, indefinitamente lungo (fig. 312). In questo ci sia una lamina A che ne chiude la luce a guisa di stantuffo, lamina che immagineremo in moto oscillatorio continuato, compreso tra due

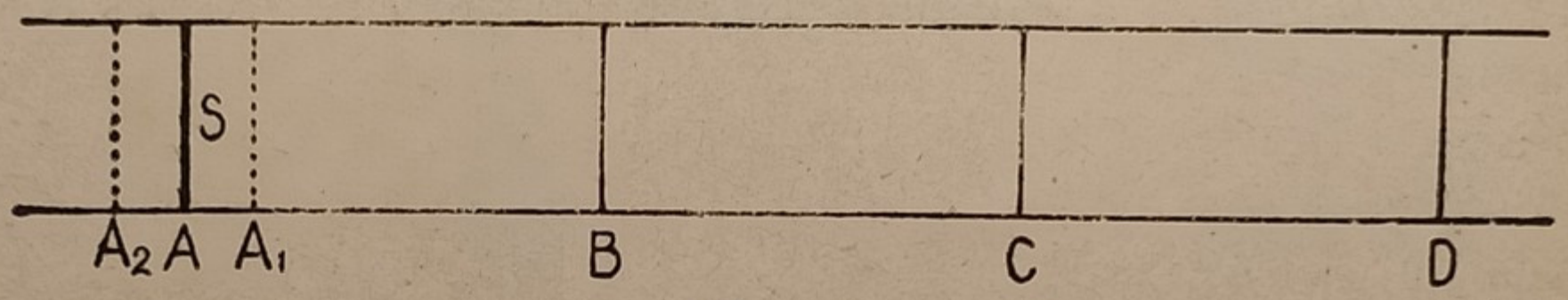

Fig. 312.

posizioni fisse A_1 A_2 equidistanti dalla posizione intermedia di equilibrio A. Mentre la lamina passa da A_2 ad A_1 l'aria che sta a destra non si avanza tutta in blocco, come avverrebbe se l'aria fosse un corpo rigido mobile lungo il cilindro, ma lo strato d'aria, aderente alla lamina vibrante viene spinto contro lo strato successivo, questo spinge quello che gli viene di seguito e così via finchè nel tempo che la lamina impiega per passare da A_2 ad A_1 la *compressione* da strato a strato sarà giunta fino a uno strato B, oltre il quale regna la pressione normale; in tale istante l'aria compresa fra A_1 e B è *compressa*, o, come si dice, tra A_1 e B si ha un'*onda condensata*.

Retrocedendo in seguito la lamina da A_1 ad A_2, essa produrrà alla sua destra una *rarefazione*, che giungerà ancora in B nell'istante che la lamina è giunta in A_2 se il suo ritorno da A_1 in A_2 durerà lo stesso tempo che ha durato l'andata da A_2 ad A_1. Tra A_1 e B si ha allora un'*onda rarefatta*, mentre la compressione precedente che nel frattempo si è avanzata, si trova compresa fra B e C, essendo $BC = A_1B$. Da questo istante la lamina riprende la sua avanzata da A_2 ad A_1, con che si forma un'*onda condensata* fra A_1 e B, mentre la rarefazione precedente si troverà fra B e C e la prima compressione

fra C e D, essendo ancora $CD = BC$. Ciò che in seguito avviene, per effetto del moto continuato alternativo della lamina oscillante, non ha bisogno di essere spiegato; la conclusione è che, mentre la lamina continua a vibrare, la massa d'aria del tubo, sia a destra sia a sinistra, ammesso che il tubo si prolunghi anche da questa parte, risulta divisa in colonne alternativamente condensate e rarefatte, o, come si dice, in *onde condensate* e *rarefatte*.

Con un'analisi più accurata del fenomeno, si verrebbe inoltre a dimostrare che lo straterello d'aria che divide l'onda condensata da quella rarefatta ha la densità normale e che lo straterello che dimezza l'una o l'altra onda possiede la massima compressione o la massima rarefazione, sicchè procedendo da strato a strato si ha una lenta e graduale variazione nella densità dell'aria.

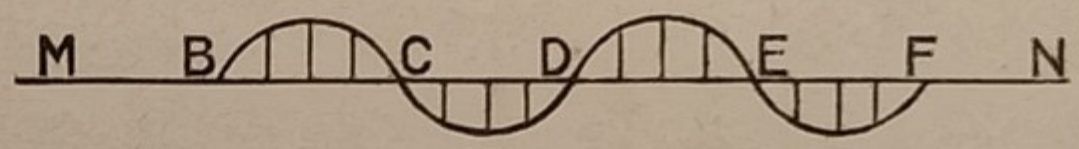

Fig. 313.

Se perciò si vuole rappresentare lo stato di diversa compressione o rarefazione che possiedono ad un dato istante i diversi strati d'aria che stanno nel tubo, sopra una retta MN parallela all'asse del tubo si segnano i segmenti $BC = CD = DE = ...$ (fig. 313), che hanno la lunghezza delle onde considerate, e in ogni punto dei singoli segmenti si tracciano dei segmenti perpendicolari alla MN, aventi lunghezza proporzionale alla compressione che regna nello strato corrispondente. Tali segmenti saranno diretti verso l'alto in corrispondenza alle compressioni e verso il basso nell'altro caso.

Riunendo allora con una linea le estremità di quei segmenti, si otterrà la linea sinuosa della figura, la quale rappresenta evidentemente lo stato dell'aria nel tubo in un determinato istante e precisamente nell'istante in cui la lamina vibrante, considerata nella figura 312 si trova in A_1. Però, lasciando scorrere il tempo, progrediscono nel tubo sia la compressione come la rarefazione, di modo che, passato, a partire dall'istante or ora considerato, un tempo eguale a quello impiegato dalla lamina per passare da A_1 ad A_2, la linea sinuosa presenta le sue sinuosità rovesciate, essendochè in quest'ultimo istante le

compressioni occupano il posto delle rarefazioni precedenti e reciprocamente.

In ogni punto l'aria del tubo risulta alternativamente compressa e rarefatta; uno qualunque degli strati d'aria compie delle vibrazioni come quelle della lamina, soltanto che i diversi strati non passano nello stesso istante per la posizione di riposo. Un orecchio che si trovasse nel tubo, ad una certa distanza dalla lamina vibrante, riceverebbe perciò dallo strato d'aria che gli è aderente una pulsazione periodica e avrebbe la sensazione di un suono se tali pulsazioni risultassero abbastanza rapide.

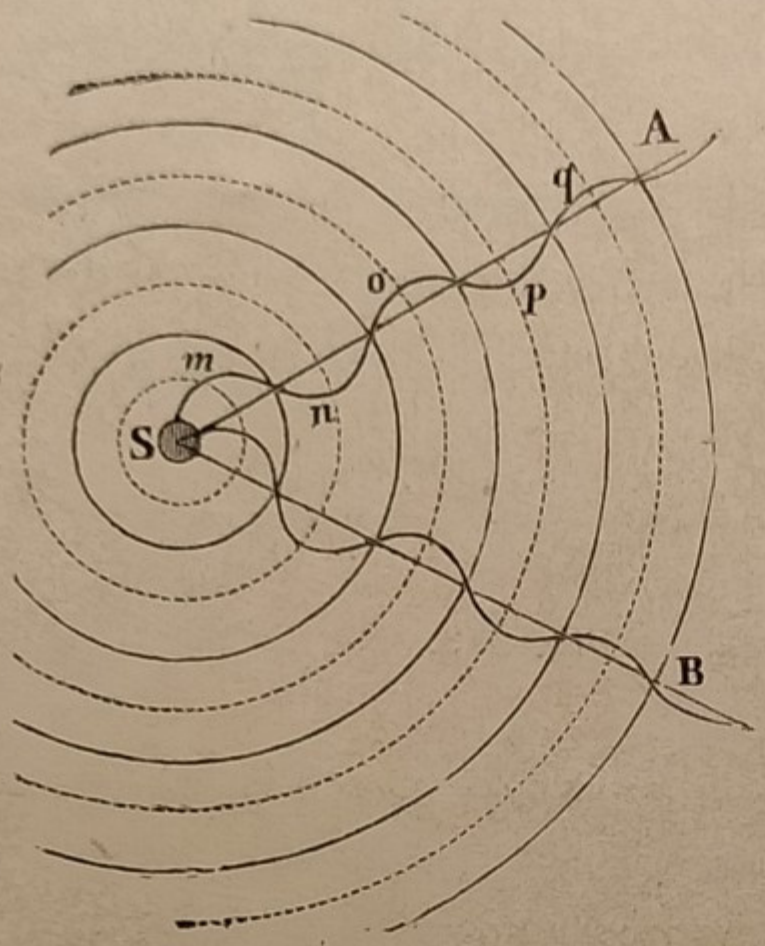

Fig. 314.

Se la sorgente sonora *S* (figura 314), come avviene d'ordinario, è circondata tutto intorno da un mezzo omogeneo, gli impulsi della sorgente determinano compressioni e rarefazioni del mezzo in tutte le direzioni e in tal modo le onde, invece di avere la forma di colonne cilindriche, hanno la forma di gusci sferici e le superficie di divisione fra le onde condensate e rarefatte — *superficie d'onda* — invece di essere dei piani sono delle superficie sferiche; ma per il rimanente le cose passano esattamente come nella propagazione nel tubo cilindrico; e lo stato di condensazione e di rarefazione del mezzo è anche in questo caso rappresentato da una linea sinuosa tracciata sopra un qualunque raggio *SA* o *SB* avente l'origine in *S*.

161. Suoni puri. — Sono anche detti suoni *semplici* perchè risultano da vibrazioni regolari, del tipo delle oscillazioni del pendolo, ognuna della stessa durata. In essi vanno distinti i seguenti caratteri: *frequenza*, *lunghezze d'onda* e *intensità*.

162. Frequenza e sua misura. — Si dice frequenza il numero delle vibrazioni complete eseguite dalla sorgente sonora in un

secondo, e costituisce quel carattere che nella musica è detto *altezza*. Due suoni giudicati dall'orecchio della stessa altezza, anche se provengono da sorgenti di natura diversa, hanno lo stesso numero di vibrazioni. Per un suono *acuto* la frequenza è *maggiore* che per un suono *grave*.

Poichè le vibrazioni di un corpo elastico sono isocrone, ossia hanno periodo indipendente dall'ampiezza, la frequenza non varia quando l'intensità del suono di una sorgente s'indebolisce per effetto della diminuzione dell'ampiezza; perciò la stessa corda di un violino, leggermente eccitata, compie vibrazioni di più piccola ampiezza che non quando viene eccitata fortemente; nel primo caso dà un suono più debole che nel secondo, ma l'altezza della nota resta inalterata.

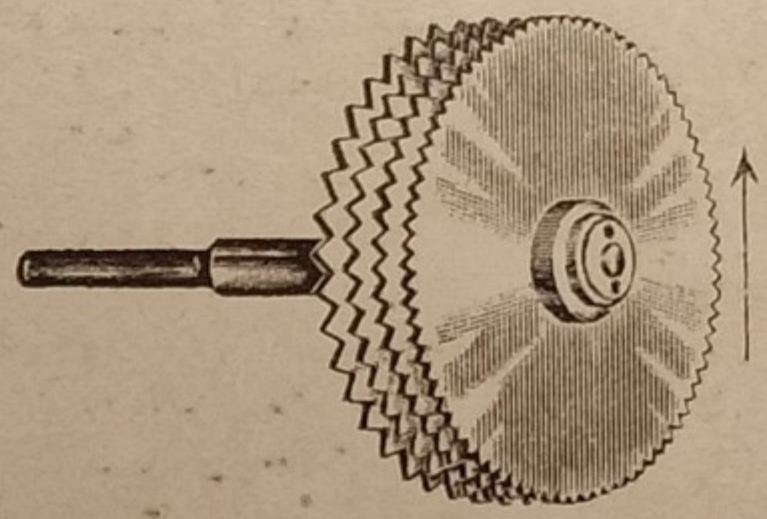

Fig. 315.

Per provare che l'altezza del suono dipende dalla frequenza delle vibrazioni, ricorreremo alle 4 ruote della figura 315 unite solidalmente e che si possono far girare unendole al motorino della figura 306. Le 4 ruote hanno numero diverso di denti, e si constata che passando il cartoncino dalla ruota che ha meno denti alle altre, si hanno quattro suoni via via più acuti.

Per la misura della frequenza delle vibrazioni di un corpo sonoro si usano due metodi:

1° Il *metodo acustico*, che è fondato sul fatto, sempre verificato dall'esperienza, che due suoni giudicati all'*unisono* dall'orecchio, corrispondono alla *stessa* frequenza; basta allora saper misurare la frequenza di uno dei due suoni.

A tale scopo serve la *sirena di Caignard de la Tour* (fig. 316). Essa consiste in un tamburo cilindrico metallico T, prolungantesi inferiormente in un tubo tronco-conico P per poterlo innestare ad un mantice che serve a iniettare l'aria nel tamburo. Un disco G porta verso la periferia una corona di fori, ed è mobile intorno al suo asse, a una piccola distanza dal coperchio del tamburo T. Questo porta anche una corona di fori in egual numero del disco mobile e praticati sopra una

circonferenza dello stesso raggio, dimodochè, durante una rotazione del disco, i fori delle due corone vengono a corrispondersi tante volte quant'è il numero dei fori stessi ed altrettante volte i fori di una serie si trovano di fronte al tratto pieno fra un foro e l'altro.

Con tale disposizione l'aria del mantice esce interrottamente, e precisamente, se i fori son 20, ad ogni giro del disco

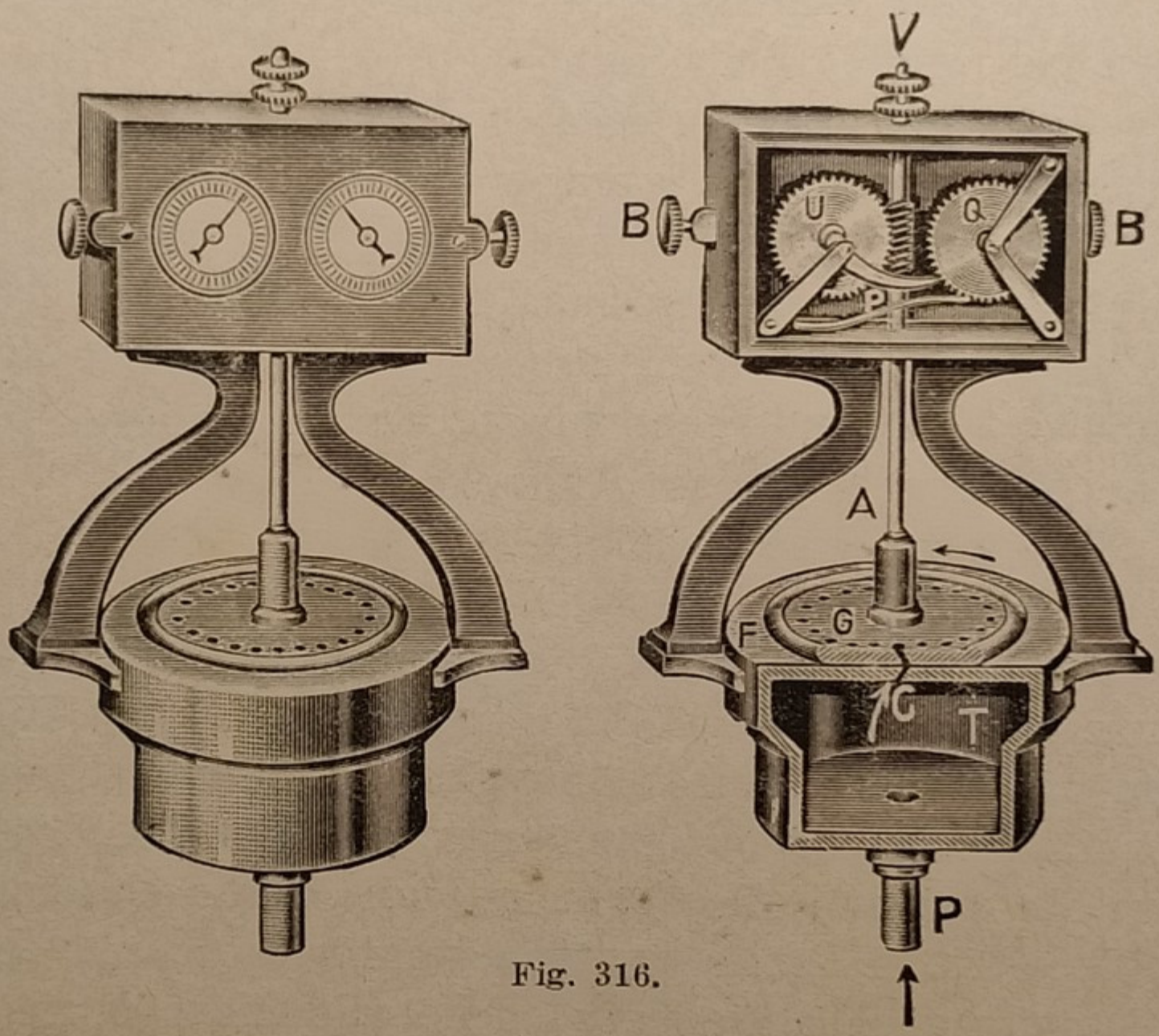

Fig. 316.

mobile, l'aria esce 20 volte e 20 volte viene intercettata. La rotazione del disco ha luogo automaticamente, per effetto di una inclinazione opportuna dei canali praticati nello spessore del disco e del coperchio, e le periodiche interruzioni dei getti d'aria costituiscono delle vibrazioni come nell'esperienza della sirena della figura 308, e per conseguenza si ottiene un suono di notevole intensità e di altezza tanto maggiore quanto maggiore è la velocità del disco, che si può far variare regolando l'afflusso dell'aria del mantice.

Un contagiri che sta nella parte superiore dell'apparecchio permette di contare il numero dei giri che fa il disco in un determinato tempo.

Per fare una misura si porta il suono della sirena all'unisono con quello di cui si vuol misurare il numero delle vibrazioni e si determina il numero dei giri compiuti dal disco della sirena in un numero di secondi determinato. Si divide il numero dei giri per il numero dei secondi, con che si ha il numero dei giri per secondo, e infine si moltiplica questo numero per il numero dei fori e il risultato dà le vibrazioni complete del suono in esame.

2° Il metodo *grafico* consiste nell'obbligare il corpo sonoro stesso a segnare la curva delle sue vibrazioni.

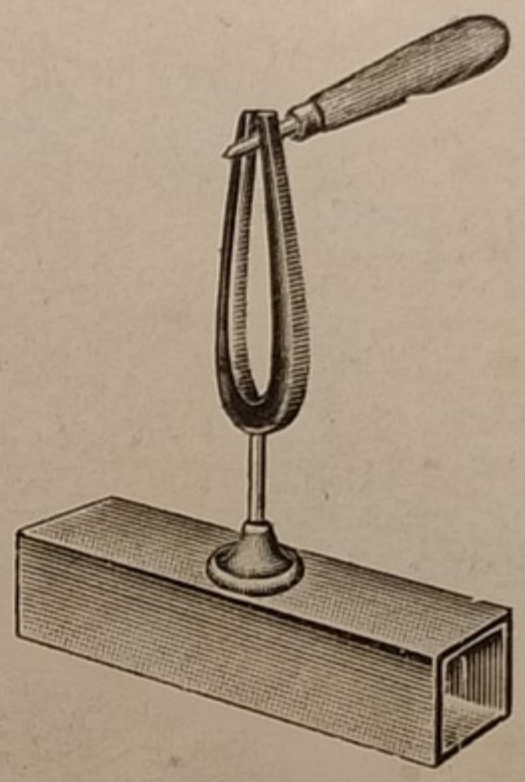

Fig. 317.

Per comprendere meglio il procedimento usato prendiamo un *corista* o *diapason* (fig. 317). Esso è formato di una forcella di acciaio a branche, dette anche *rebbi*, parallele o convergenti, riunite nella curva con una colonnina che ne costituisce il supporto. Eccitando il corista percotendone una delle branche o, se queste sono convergenti, facendovi passare in mezzo un cilindretto di ferro di diametro un po' più grande della loro distanza, si ottiene un suono nettamente musicale e le estremità libere delle branche assumono un moto oscillatorio rapido che ce le fa apparire confuse.

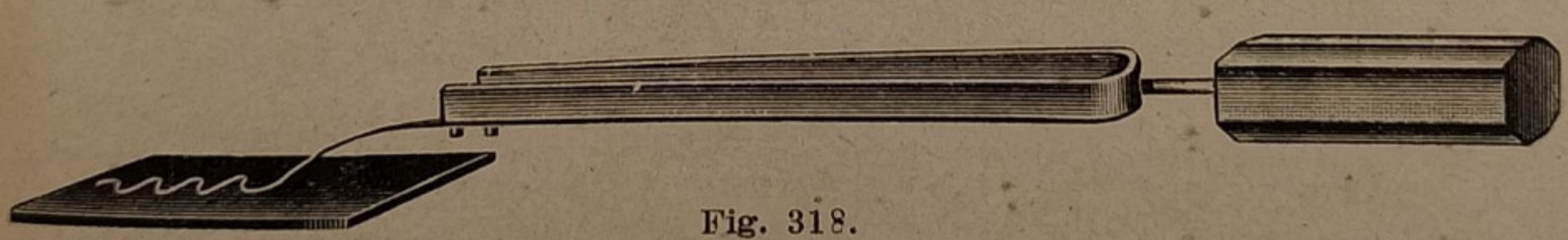

Fig. 318.

Fissiamo ora a una delle branche una punta metallica, detta *stilo*, e messo in vibrazione il corista, moviamolo rapidamente sopra una lastra di vetro affumicata, in modo che durante il moto l'estremità dello stilo strisci sulla lastra, mentre il piano delle branche risulta parallelo a quello della lastra. Si ottiene una linea sinuosa continua e regolare, ciascun dente della quale corrisponde a una vibrazione (figura 318).

La disposizione seguìta per misurare la frequenza delle vibrazioni del corista è resa chiara dalla figura 319. *C* è un cilindro affumicato che mentre si fa girare mediante una manovella si sposta parallelamente all'asse, essendo l'albero di rotazione fatto da una parte a vite impegnata nel cuscinetto *E* fatto a madrevite. Con tale disposizione se si fa appoggiare lo stilo di un corista vibrante *D* sul cilindro, verrà segnata una linea sinuosa, e siccome ogni sinuosità corrisponde a una vibrazione completa basta conoscere la velocità di rotazione del cilindro per avere il numero delle vibrazioni per secondo.

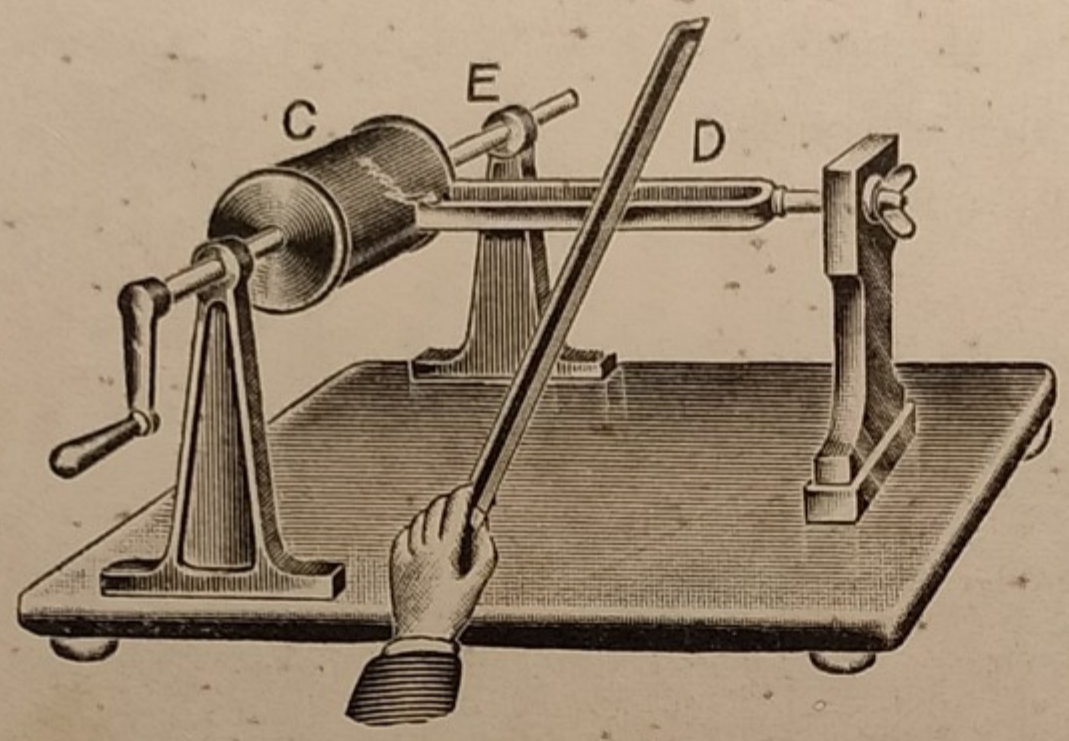

Fig. 319.

Per non essere obbligati a misurare la velocità del cilindro si dispone vicino al primo un altro diapason, che potremo dir *campione*, di cui già si conosce il numero delle vibrazioni,

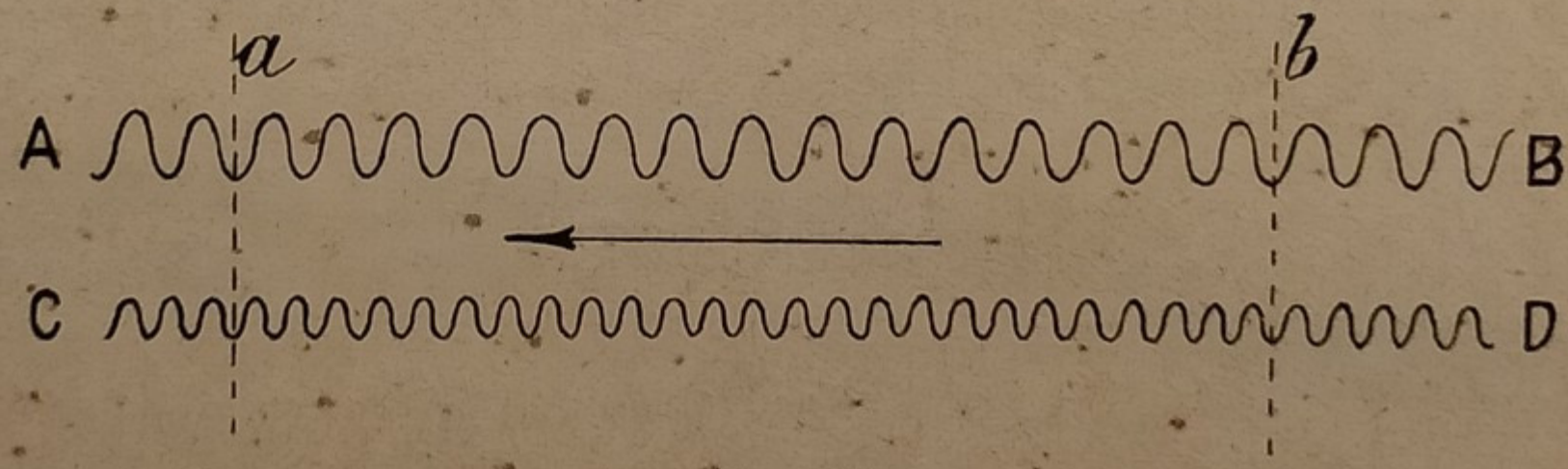

Fig. 320.

munito pure di uno stilo, in modo che i due stili segnino sul cilindro due *linee sinuose parallele*. Distesa in piano la carta affumicata svolta dal cilindro (fig. 320), si contano sulle due curve le sinuosità comprese fra due generatrici *a* e *b* del cilindro, e il rapporto fra quei due numeri misura il rapporto fra i numeri delle vibrazioni compiute dai due suoni nello stesso tempo. Se il diapason campione ha 435 vibrazioni com-

plete al secondo, e tra le due generatrici del cilindro si trovano 25 sinuosità del diapason campione e 15 dell'altro che si vuol esaminare, il numero N di vibrazioni che questo compie al secondo è dato dalla proporzione:

$$\frac{N}{435} = \frac{15}{25} \text{ ; ossia } N = 261 .$$

Il metodo è generale, ossia serve alla misura del numero delle vibrazioni corrispondenti a un suono qualsivoglia; basta aggiungere al corpo sonoro uno speciale dispositivo, mediante il quale il moto vibratorio venga comunicato ad uno stilo che si fa strisciare sul cilindro affumicato.

163. Limite dei suoni percettibili. — Un movimento vibratorio sonoro produce una sensazione auditiva solo se è compreso entro certi limiti di frequenza, che varia generalmente da 8 a 24.000 vibrazioni complete al secondo. Al disotto di 8 le vibrazioni vengono percepite come colpi distinti, al disopra di 24.000 l'orecchio è sordo.

164. Corista cronografico. — Coi cronometri ordinari si può apprezzare appena 1 quinto di secondo; con cronografi a cilindro registratore si può arrivare a $\frac{1}{100}$ e anche a $\frac{1}{1000}$ di secondo.

L'apparecchio è adoperato per la misura della durata di fenomeni abbastanza fugaci e a tale scopo si usa un corista, di cui è nota la frequenza. Ma un corista comune eccitato e lasciato a sè, compie delle vibrazioni che vanno diminuendo di ampiezza, fino a spegnersi in un tempo più o meno breve, dimodochè la curva che il suo stilo traccia sul cilindro affumicato moventesi con moto uniforme presenta delle sinuosità bensì egualmente distanziate — legge dell'isocronismo — ma che hanno un'ampiezza via via decrescente (fig. 321), si hanno

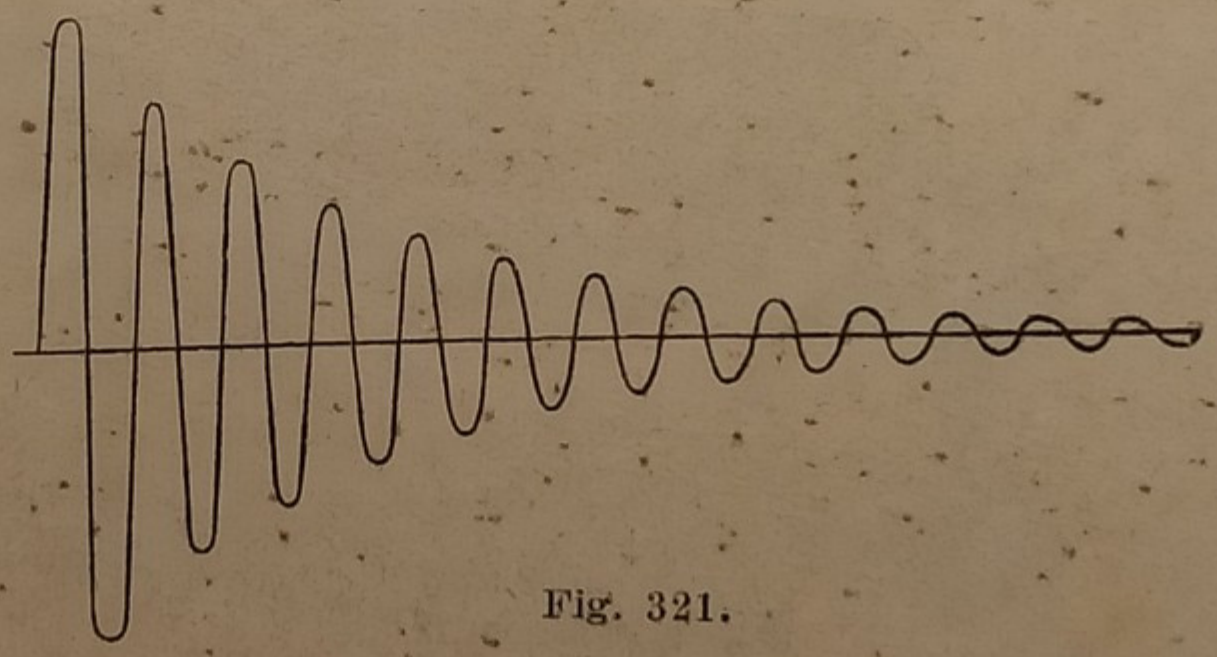

Fig. 321.

cioè delle vibrazioni *smorzate*. Per avere vibrazioni *persistenti*, cioè di ampiezza costante, bisogna applicare al corista un organo *vivificatore*, che compensi cioè la perdita di energia

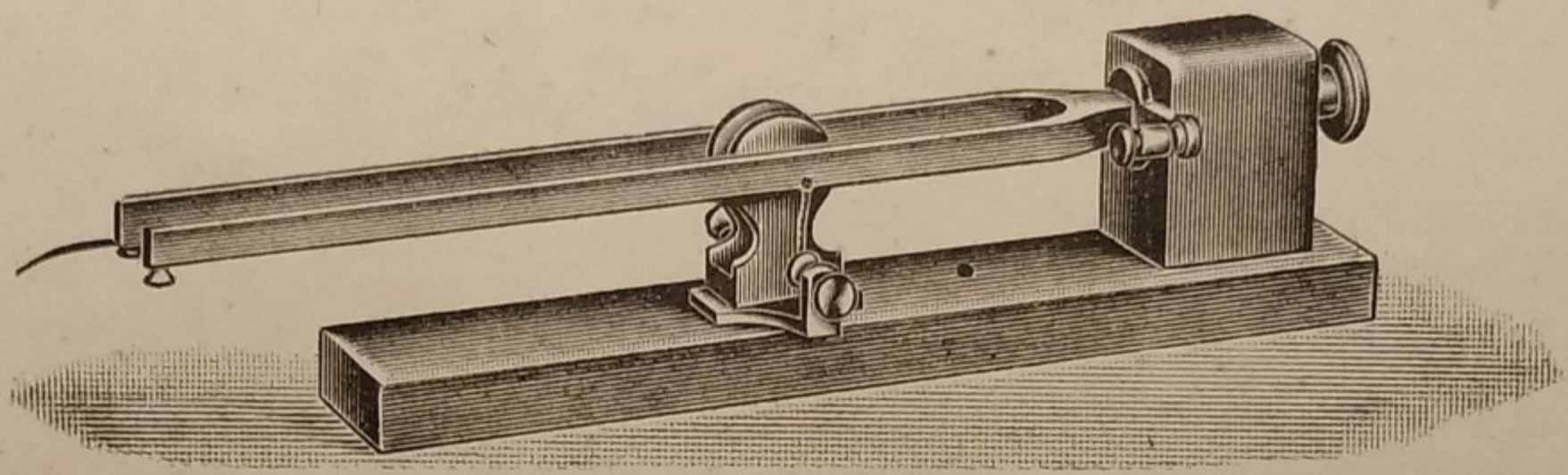

Fig. 322.

che subisce il corista. Perciò fra le due branche di esso si fissa una elettrocalamita che entrando automaticamente in azione in determinati istanti, serve allo scopo (fig. 322). Il corista disposto in tal guisa è anche chiamato *elettrodiapason*.

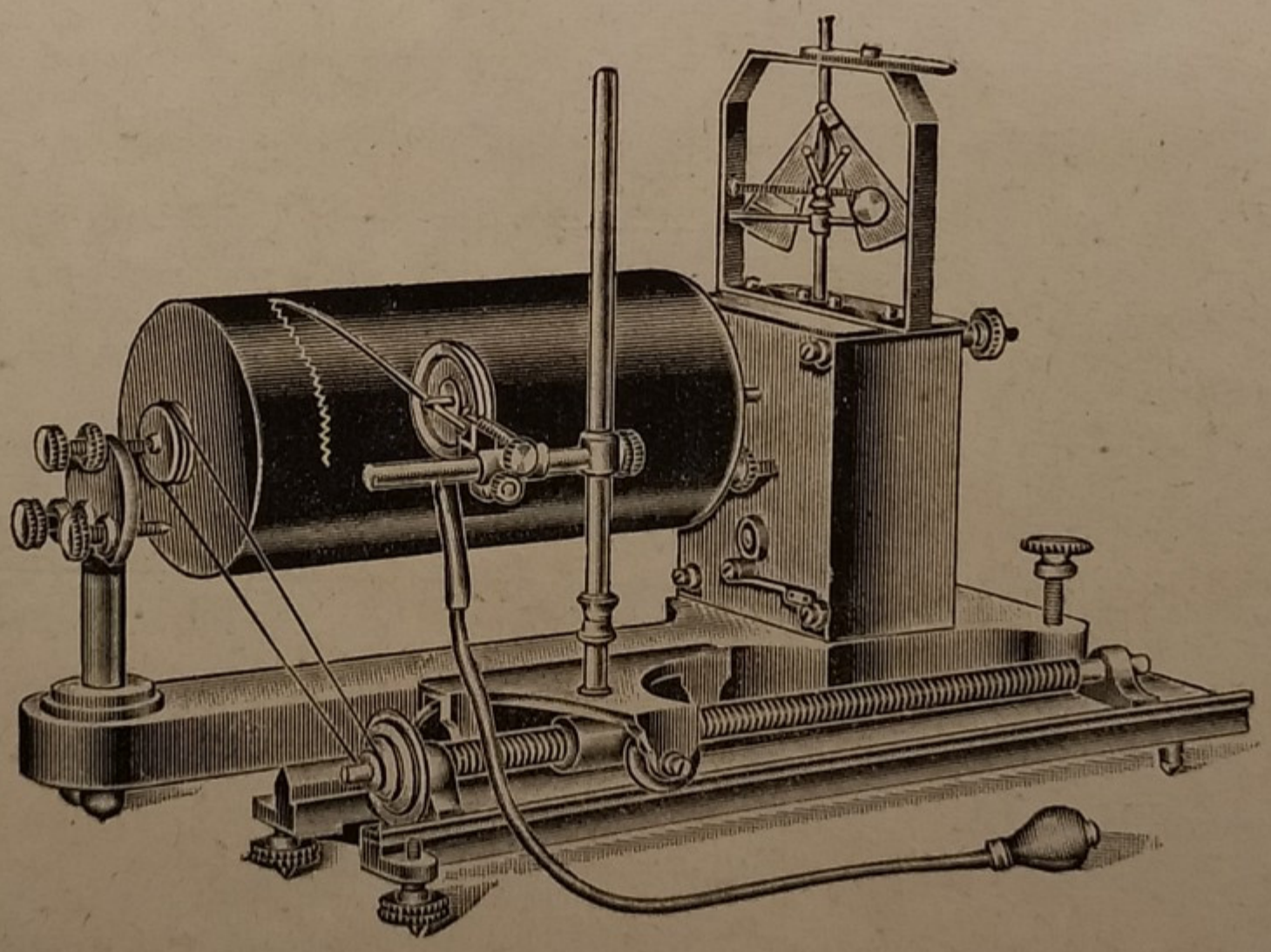

Fig. 323.

Il corista ha lo stilo che poggia sul cilindro registratore, che è mosso spesso da un meccanismo d'orologeria, come mostra la figura 323. Sul cilindro poggia, vicino a quello del

corista, un altro stilo S comandato da un congegno elettrico (fig. 324), sui particolari del quale non possiamo entrare, mancandoci le nozioni relative che verranno esposte nella Elettricità.

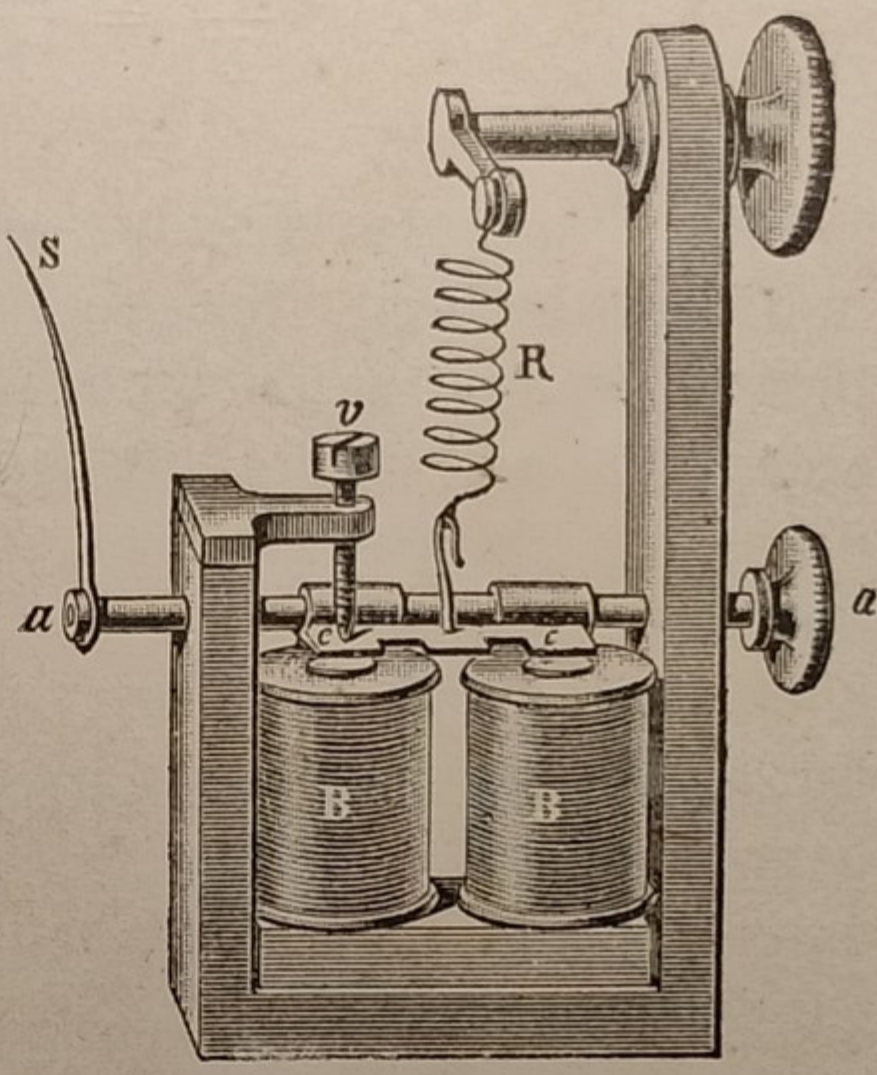

Fig. 324.

Basti sapere che tale apparecchio produce elettricamente un piccolo movimento dello stilo S al principio e uno alla fine del fenomeno di cui si vuole misurare con esattezza la durata, talchè, spogliato il diagramma, avremo sulla carta affumicata la curva AB del diapason e la linca CD tracciata dal secondo stilo (fig. 325). Su questa appariscono due cuspidi in H e K prodotte al principio e alla fine del fenomeno in esame. Si segnano le generatrici a e b del cilindro passanti per H e K e si contano le sinuosità complete del corista fra di esse

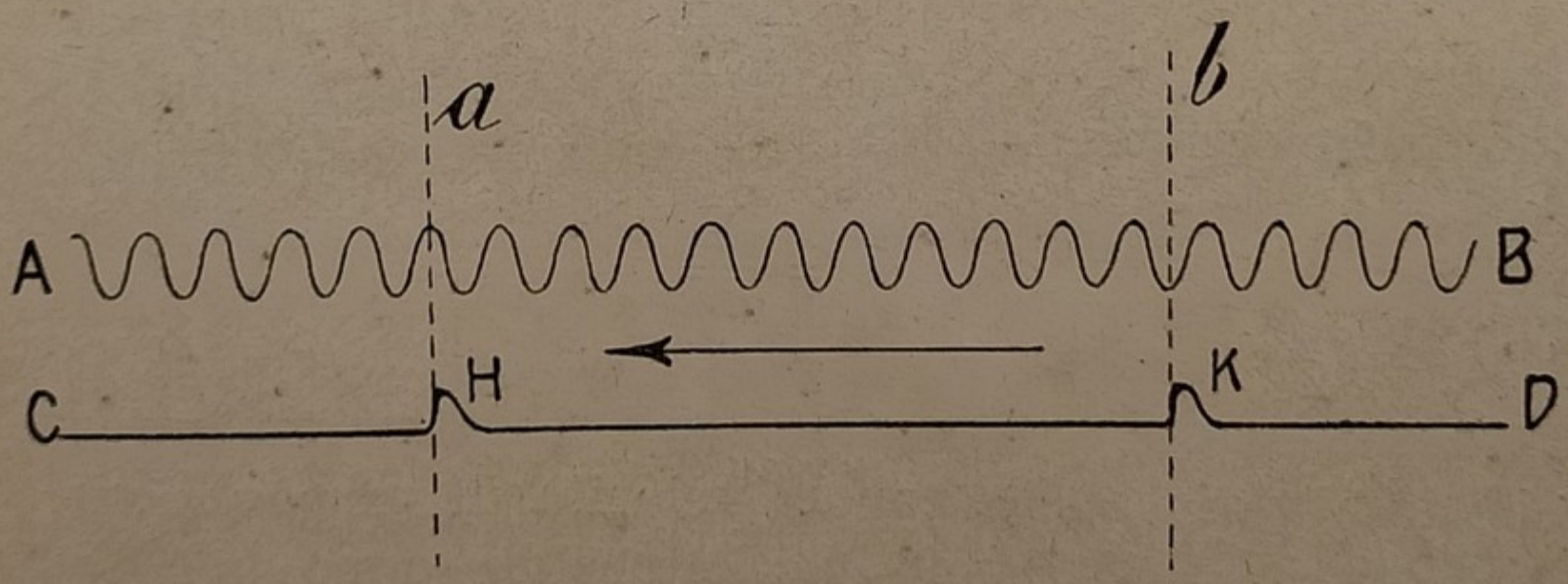

Fig. 325.

comprese; se tali sinuosità sono n e se N è il numero delle vibrazioni complete prodotte dal corista in un secondo, la durata del fenomeno è $\frac{n}{N}$ secondi. Nel caso illustrato dalla figura n è 10,5,

e ammesso che il corista compia 128 vibrazioni complete al secondo, si ha:

$$\frac{n}{N} = \frac{10{,}5}{128} = 0^{s},082 .$$

165. Lunghezza d'onda. — Alla fine del § 160 abbiamo messo in rilievo le onde sferiche formantisi, attorno a un corpo vibrante, in un mezzo omogeneo indefinito. Si è convenuto di chiamare *onda sonora* l'insieme di due strati contigui, l'uno condensato e l'altro rarefatto, e *lunghezza d'onda* lo spessore dei due strati.

Qualunque sia il mezzo di propagazione è evidente che nel tempo che la sorgente sonora impiega a compiere una vibrazione completa, ossia, in un *periodo*, il movimento vibratorio si avanza di un tratto pari a una lunghezza d'onda; sicchè indicando questa con λ, con T il periodo, e con V la velocità di propagazione, si ha:

$$\lambda = VT$$

o altrimenti, indicando con N la frequenza, essendo evidentemente:

$$T = \frac{1}{N}$$

si può anche scrivere:

$$\lambda = \frac{V}{N} .$$

La lunghezza d'onda quindi non caratterizza un suono, poichè essa varia anche con la velocità di propagazione.

Per l'aria $V = 333^{m}$ a 0^{o}, sicchè per un suono di 100 vibrazioni complete si ha $\lambda = 3^{m},33$.

Per l'acqua $V = 1435^{m}$, per $N = 100$, si ha $\lambda = 14^{m},35$.

Chiameremo poi *raggio sonoro* la linea secondo la quale, da molecola a molecola del mezzo, si propaga il moto vibratorio.

Nel caso della propagazione lungo un tubo cilindrico, sono raggi sonori tutte le rette parallele al suo asse; se la propaga-

zione avviene in un mezzo omogeneo, che circonda da ogni parte la sorgente sonora, sono raggi sonori tutte le semirette uscenti dalla sorgente.

È poi manifesto che, in base alla definizione di superficie d'onda, data nel paragrafo precedente, *i raggi sonori risultano sempre normali alle superficie d'onda che attraversano.*

166. Intensità. — L'intensità è il carattere per cui un suono apparisce più o meno forte; e si dimostra teoricamente che l'intensità del suono all'origine, che diremo intensità *oggettiva*, è *proporzionale alla forza viva del corpo vibrante.*

Ricordando l'espressione della forza viva $\frac{1}{2}\ mv^2$ (31), è chiaro che l'intensità è proporzionale alla massa vibrante, e al quadrato dell'*ampiezza* della vibrazione, poichè velocità e ampiezza risultano nel moto oscillatorio fra loro proporzionali. L'intensità *soggettiva* del suono, cioè quella con cui il suono viene percepito dall'orecchio, dipende egualmente dalla forza viva comunicata all'orecchio, e quindi si capisce che deve diminuire col diminuire della densità del mezzo, perchè la massa del mezzo che percuote l'orecchio durante una vibrazione diminuisce colla densità e si annulla nel vuoto; ciò è in armonia con quanto abbiamo già esposto (159).

L'intensità *soggettiva*, quando la propagazione avviene in un mezzo omogeneo e indefinito, diminuisce col crescere della distanza, e precisamente è *inversamente proporzionale al quadrato della distanza dalla sorgente sonora.* Infatti a una distanza r dalla sorgente, le molecole del mezzo in movimento sono distribuite sopra la sfera di raggio r che ha per superficie $4\pi r^2$, avente nel centro il corpo sonoro. La forza viva A, trasmessa dalla sorgente, essendo uniformemente distribuita su tale superficie, l'unità di questa ne possiede una frazione $\frac{A}{4\pi r^2}$, cioè una quantità inversamente proporzionale al quadrato di r.

167. Tubi, cornetti acustici, portavoce. — Se la propagazione ha luogo dentro un tubo cilindrico, la forza viva si comunica da uno strato ad uno successivo avente la stessa superficie, che è la sezione retta del cilindro, perciò essa si mantiene presso a poco costante a tutte le distanze. Da ciò l'uso

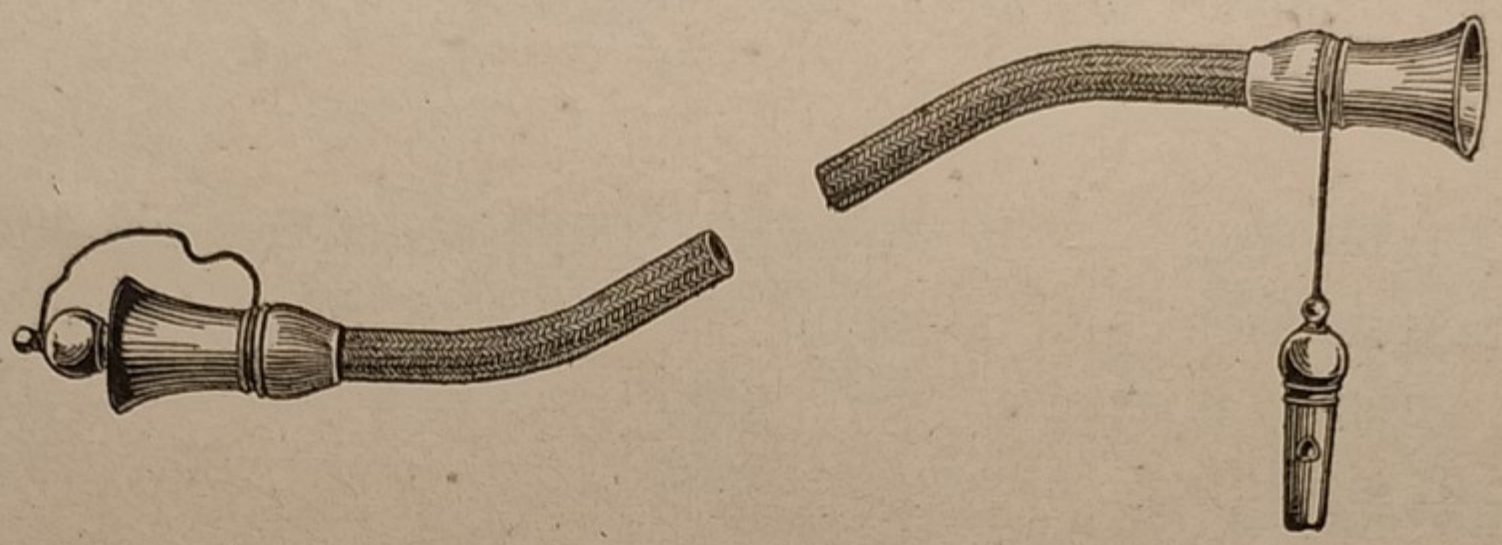

Fig. 326.

dei *tubi acustici*, che son tubi che, seguendo un percorso qualunque, mettono capo ai due locali fra cui si vuole stabilire una comunicazione orale. Parlando contro una imboccatura che sta all'estremità del tubo, la voce viene chiaramente percepita da un'altra persona che accosti l'orecchio all'altro estremo (fig. 326).

Quando non si parla, in ciascuna delle due imboccature estreme del tubo è impegnato un tappo a fischio, dimodochè la persona che fa la chiamata estrae il tappo che sta dalla sua parte e soffiando con forza dentro l'imboccatura fa agire il fischietto dell'altra estremità. Giova però osservare che l'uso ormai universale del telefono ha servito ad abolire quasi totalmente quello dei tubi acustici.

Fig. 327.

Nel *cornetto acustico* usato dalle persone di orecchio ottuso, le onde sonore si riflettono sulle pareti e portano all'orecchio la forza viva che proviene da una superficie d'onda alquanto estesa (fig. 327).

Il *portavoce* o *megafono*, largamente usato nella marina e assai nell'ultima guerra, per trasmettere ordini e fare comunicazioni a distanza, è un lungo tubo di lamiera, conico, con l'estremità stretta fatta a imboccatura, e l'altra aprentesi

ad imbuto (fig. 328). Agisce come il cornetto acustico. Le trombe dei comuni fonografi sono veri portavoce.

Daremo infine un cenno dello *stetoscopio*, che consiste in un imbuto fortemente svasato unito a un tubetto lungo una ventina di centimetri. Il medico se ne serve per ascoltare i rumori che si producono nel cuore o nei polmoni, appoggiando l'imbuto contro il petto del paziente e accostando l'estremità del tubo al proprio orecchio.

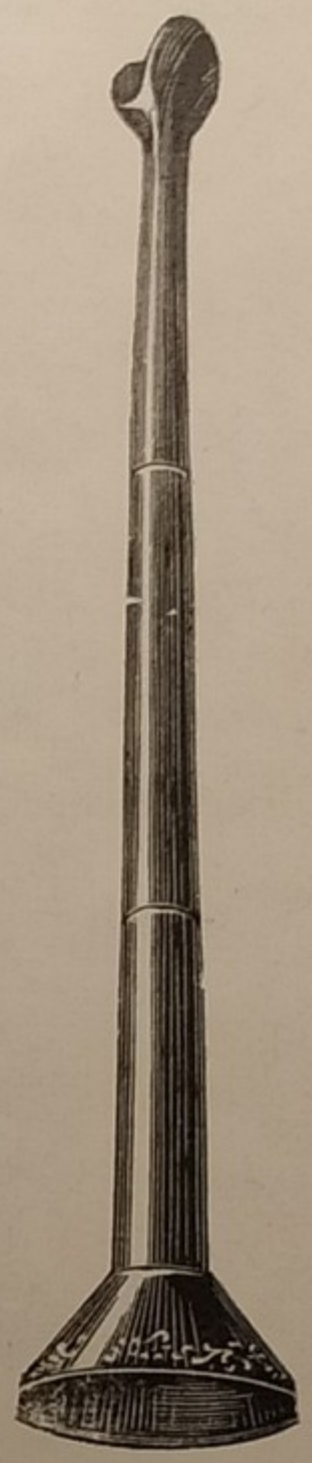

Fig. 328.

168. Suoni complessi; loro timbro; rumori. — Di solito un suono musicale non corrisponde a una serie unica di vibrazioni di frequenza determinata; fa eccezione il corista. Tutti gli altri corpi sonori, compresa la voce umana, emettono un miscuglio di suoni semplici, dovuti cioè a diverse serie di vibrazioni di frequenza diversa.

Ciò si prova scrivendo col metodo noto (162) la curva caratteristica del suono che si vuol esaminare. Mentre col corista si ottiene la nota curva sinuosa semplice, con altre sorgenti le curve riescono più complesse, presentanti nelle sinuosità principali delle sinuosità più minute, dovute a suoni concomitanti più acuti. L'esame della struttura di un suono complesso è detto *analisi del suono* e si può fare, anche meglio che col metodo grafico, con la *capsula manometrica* e uno specchio ruotante. La capsula è rappresentata in prospettiva e in sezione dalle figure 329 e 330; essa è una piccola scatola divisa in due concamerazioni da una sottile membrana di caoutchouc KK. A sinistra la capsula porta un tubo a; a destra mettono capo i due tubi b e c, il primo dei quali è unito alla condotta del gas illuminante o meglio a un apparecchio ad acetilene che esce per il tubo c finito in punta affilata. Il gas arde all'estremità di c con una fiammella chiara fusiforme, perfettamente tranquilla finchè la membrana rimane in riposo. Ma se si emette un suono davanti l'apertura a le compressioni e le rarefazioni d'aria

agiscono sulla membrana; con ciò la pressione del gas nella camera destra della capsula aumenta e diminuisce e in conseguenza l'altezza della fiammella varia in modo continuo. Vista direttamente, la fiammella apparisce all'occhio alquanto più lunga che allo stato di riposo e perde alquanto di luminosità.

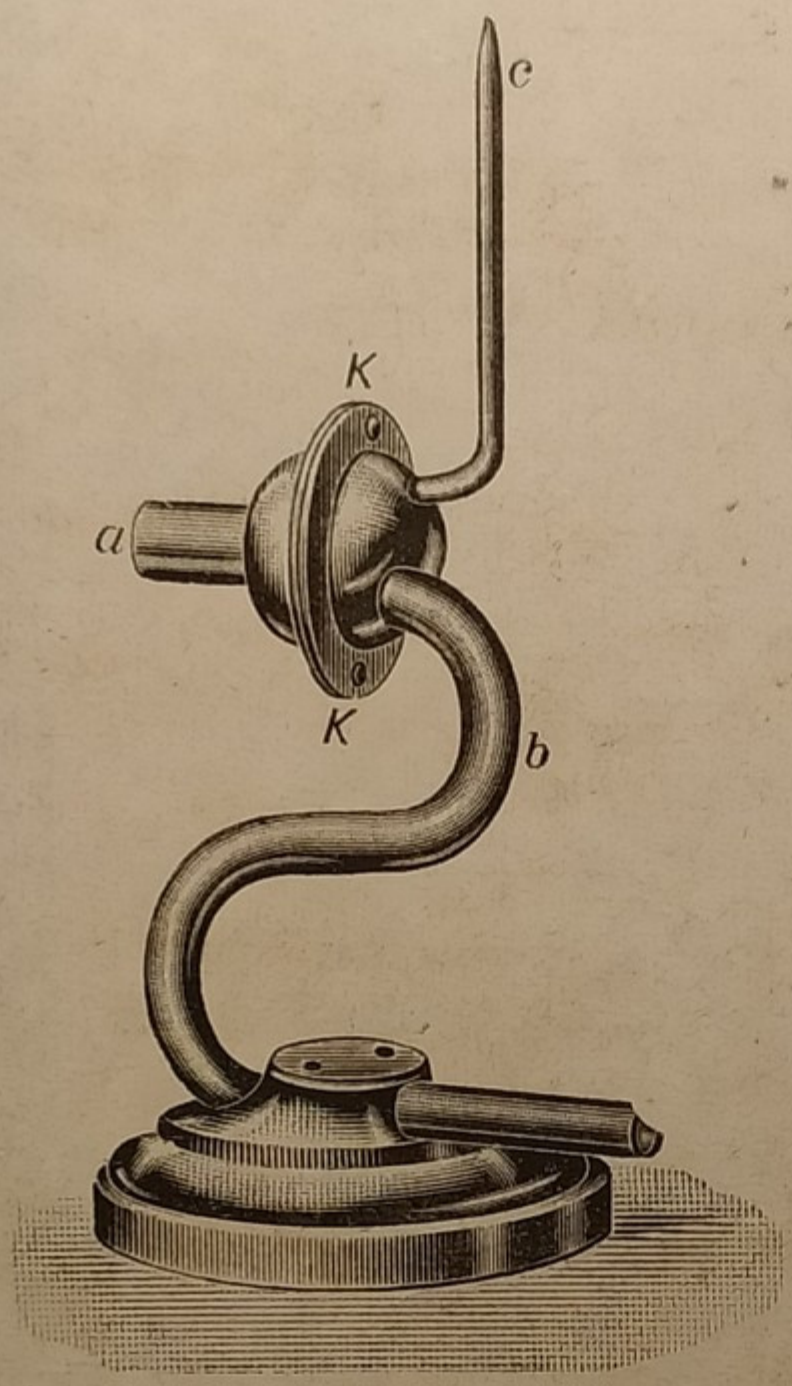

Fig. 329.

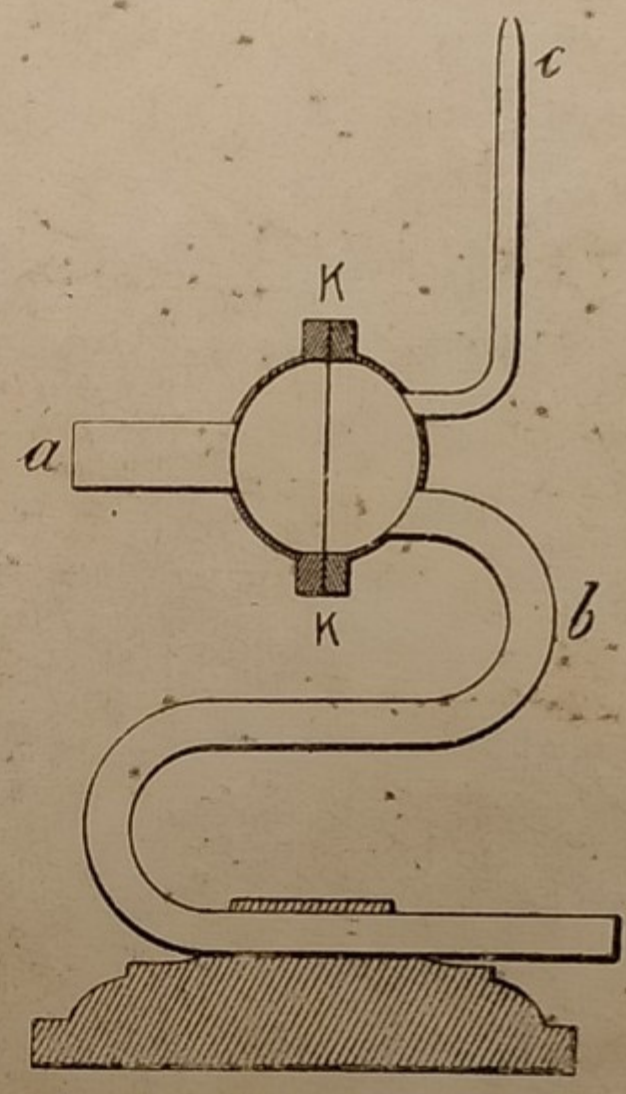

Fig. 330.

Per esaminare meglio lo stato della fiamma si fa uso di uno specchio ruotante, com'è mostrato nella figura 331. L'apparecchio comprende quattro specchi piani che formano le faccie di un parallelepipedo *A* a base quadrata, ed è messo in rotazione mediante un semplice dispositivo. La fiammella, circondata da un cilindro di vetro per sottrarla all'agitazione dell'aria prodotta dal movimento degli specchi, viene esaminata guardandone l'immagine dentro gli specchi stessi. Se essa è ferma si scorge un nastro luminoso continuo, ma tosto che si mette a vibrare si scorge una fila di immagini separate da intervalli oscuri (fig. 332).

Le dentellature del nastro luminoso sono più o meno fitte a seconda della diversa frequenza del suono esaminato e della velo-

cità dello specchio. Se il suono è semplice le immagini della fiamma sono tutte eguali, se è complesso sono diverse. Così se il suono

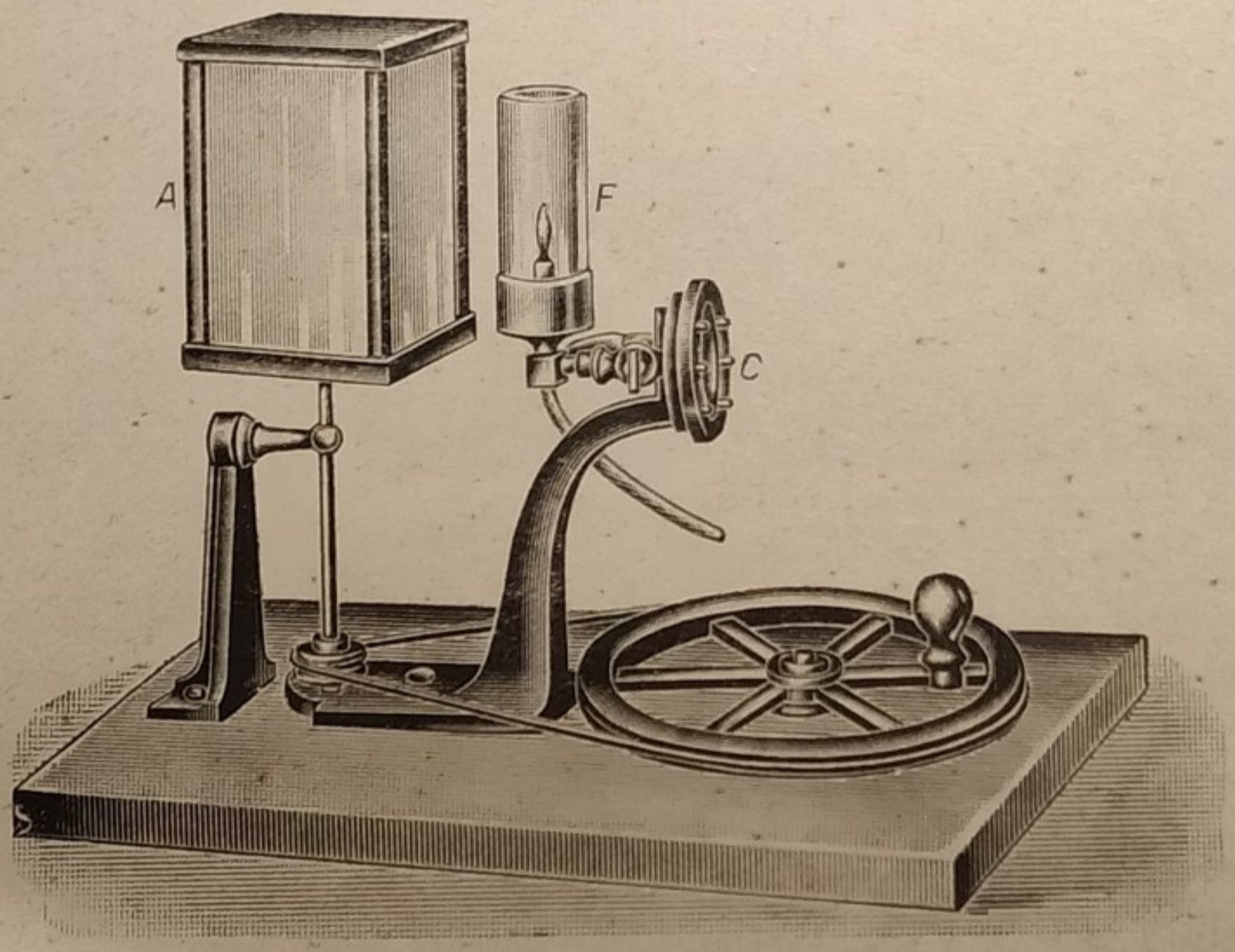

Fig. 331.

complesso è formato dalla sovrapposizione di due suoni semplici di frequenza 1 e 2 si ottiene la forma della figura 333.

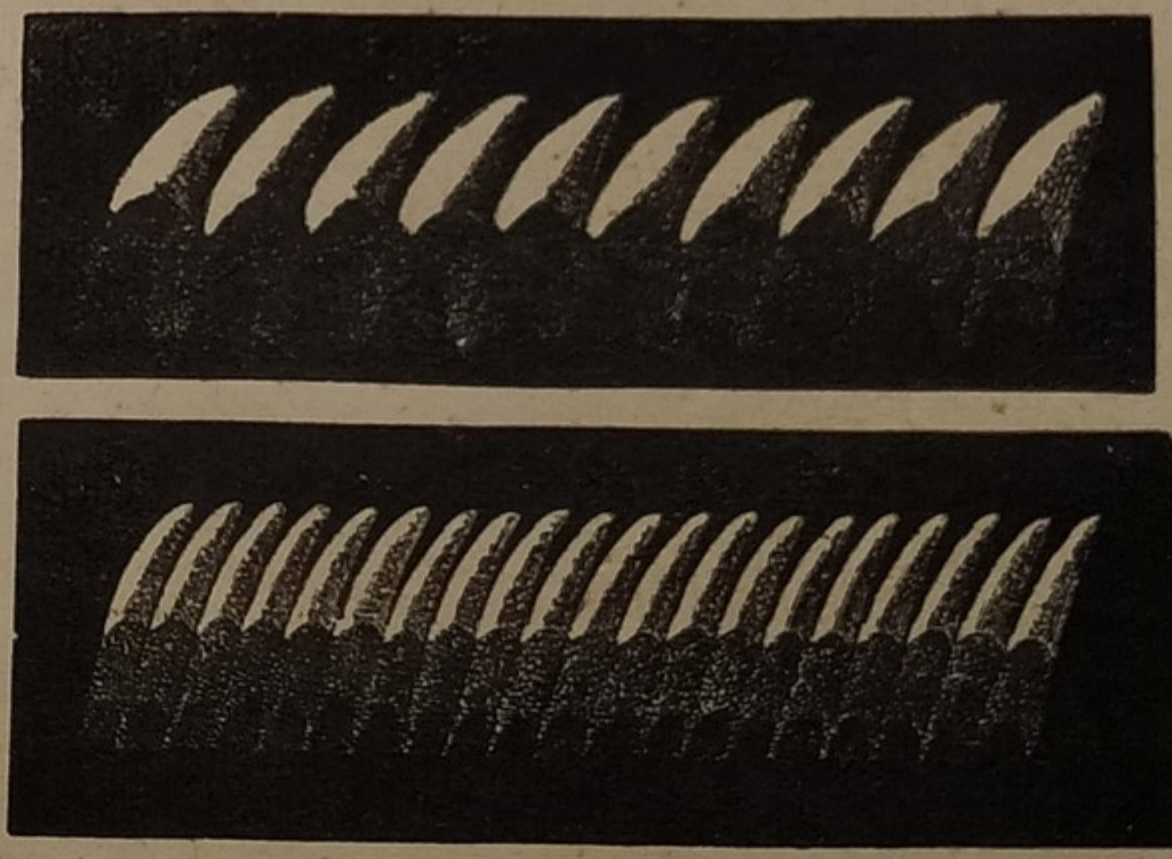

Fig. 332.

I suoni dati dagli strumenti musicali analizzati convenientemente si mostrano formati da un suono dominante semplice, più intenso, e da altri suoni più deboli e più acuti.

Fatta eguale a 1 la frequenza del suono dominante, i suoni concomitanti hanno frequenze comprese nella serie 2, 3, 4... La diversa struttura di un suono, intesa come si è spiegato,

costituisce quel carattere che in musica è detto *timbro* o anche *tempera* o *metallo*.

Anche le vocali sono suoni complessi, in maniera però anche più complicata dei suoni dati dagli strumenti musicali.

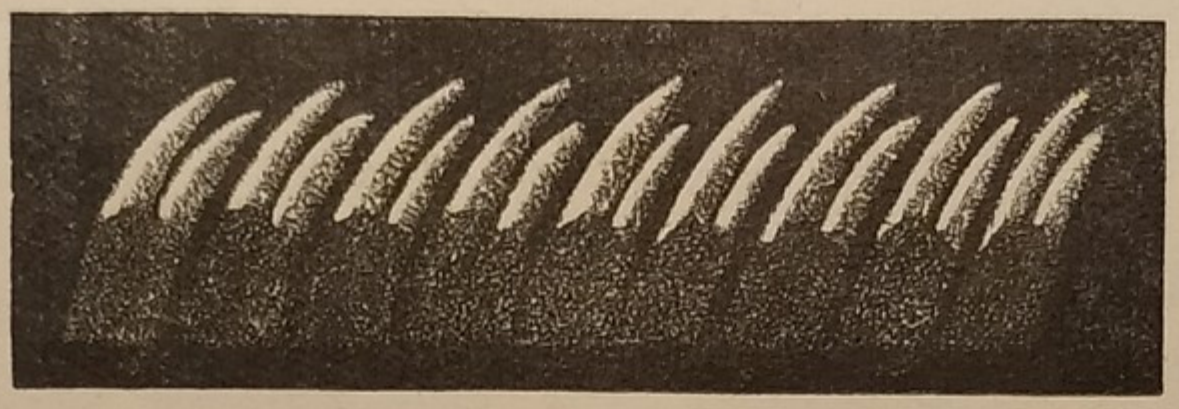

Fig. 333.

Diremo infine poche parole sui *rumori*. Questi differiscono dai suoni musicali perchè presentano una struttura molto complessa, e le vibrazioni che li originano sono in massima parte irregolari. Spesso però anche nei rumori si riscontra un carattere più o meno musicale. Un'asticella di legno lasciata cadere sul pavimento produce un rumore, ma lasciandone cadere successivamente diverse di dimensioni adatte, si hanno dei rumori che manifestano uno spiccato carattere musicale, specialmente in ordine all'altezza. Il *xilofono*, strumento non raramente ora usato nell'esecuzione di musica leggera, è formato di numerose asticelle di legno di varia dimensione, opportunamente sospese, che vengono battute dal suonatore con due piccoli martelli.

169. Riflessione del suono. — Un ostacolo, per esempio un muro, che si trovi ad una certa distanza dalla sorgente, *riflette* le onde sonore che vi arrivano, cioè le obbliga a propagarsi in senso opposto.

Senza entrare in una minuta analisi del fenomeno, supponiamo che MN rappresenti, in sezione perpendicolare col piano della figura, un ostacolo piano, come sarebbe un muro, ed O la sorgente sonora (fig. 334).

Le onde generate in O si propagano in modo continuo e regolare attorno alla sorgente fino all'ostacolo, ma qui giunte, il moto vibratorio torna indietro in modo che viene a formarsi un altro sistema di onde, dette *onde riflesse*, che hanno per centro il punto O_1, *simmetrico* di O rispetto al piano MN.

Per precisare meglio il fenomeno consideriamo un raggio qualunque sonoro OB appartenente al sistema di onde dirette e che chiameremo *raggio incidente*, ad esso corrisponde il raggio sonoro *riflesso* BC, la cui direzione passa per O_1. Ciò vuol dire che al movimento diretto che si propaga nel mezzo nella direzione OB, corrisponde un movimento riflesso secondo la direzione BC, di guisa che se in O si produce un suono di una brevissima durata, quale è un colpo di pistola, un orecchio posto in C percepisce il suono *diretto* lungo la OC, e *in seguito* un altro suono che gli proviene apparentemente da O_1. Le cose passano come se, soppresso l'ostacolo MN, *due* colpi venissero sparati *contemporaneamente* in O ed in O_1, colpi che l'orecchio percepirebbe in tempi diversi date le diverse distanze dell'orecchio C dalle sorgenti O ed O_1.

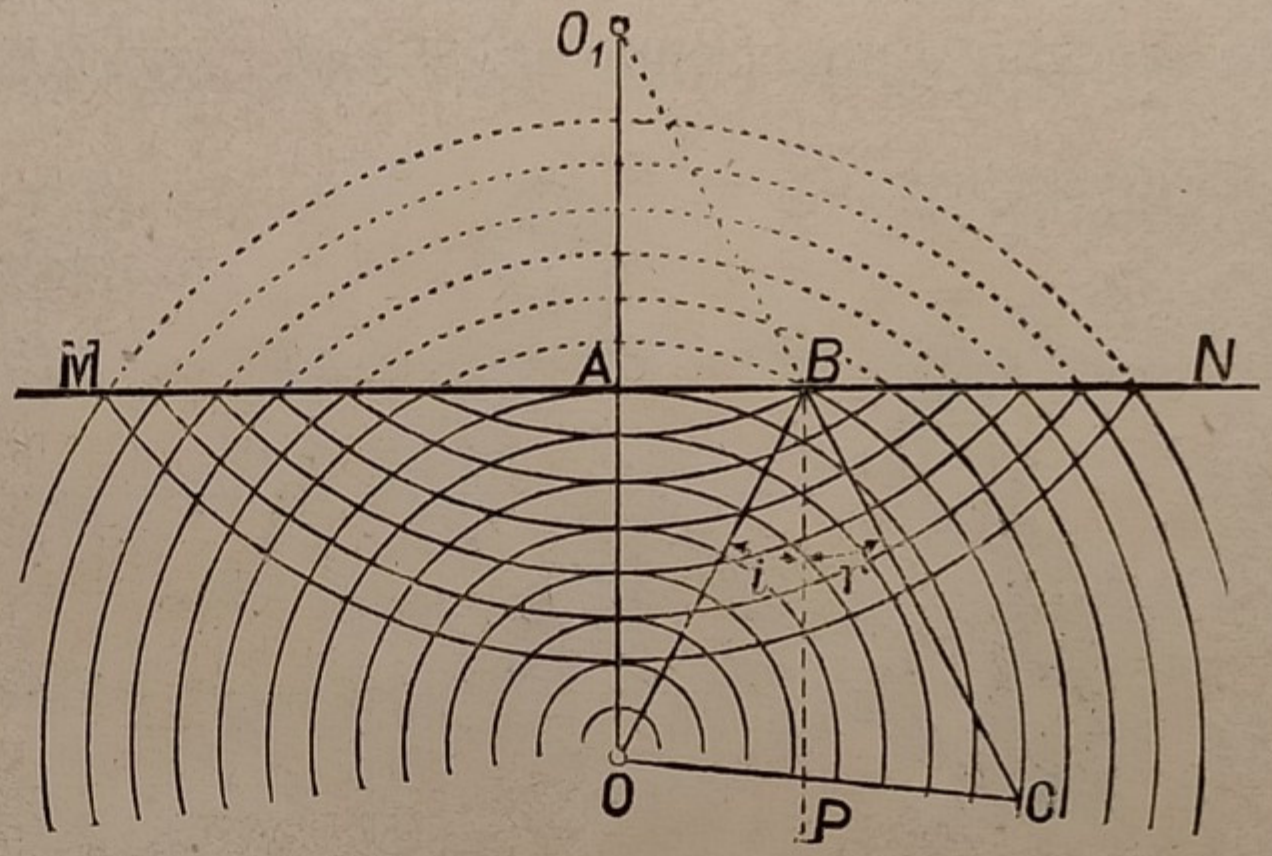

Fig. 334.

Il meccanismo della riflessione del suono è lo stesso di quello della riflessione della luce; nel caso ora da noi considerato il piano MN fa l'ufficio di uno specchio piano dell'Ottica e le leggi della riflessione del suono coincidono con quelle della riflessione della luce:

1° *Il raggio incidente, il raggio riflesso e la normale alla superficie riflettente nel punto d'incidenza, sono sullo stesso piano.*

2° *L'angolo di incidenza i* — l'angolo OBP — *e l'angolo di riflessione r* — l'angolo CBP — *sono eguali.*

Perciò tutti i raggi sonori emanati dalla sorgente O dànno luogo a raggi riflessi che sembrano venire da O_1; questo punto lo chiameremo *immagine sonora virtuale* di O.

170. Specchi coniugati. — L'esperienza degli specchi coniugati verifica l'identità delle leggi geometriche per il suono, per il calore e per la luce.

Due specchi sferici concavi sono disposti l'uno di fronte all'altro, a una distanza di parecchi metri, e i loro assi geometrici coincidono. Vedremo nell'Ottica che se si pone una candela nel *fuoco principale F* dello specchio *M'*, cioè in un punto dell'asse che dista dal vertice dello specchio la metà del suo *raggio di curvatura*, ossia del raggio della sfera a cui lo specchio appartiene (fig. 335), i raggi luminosi della candela

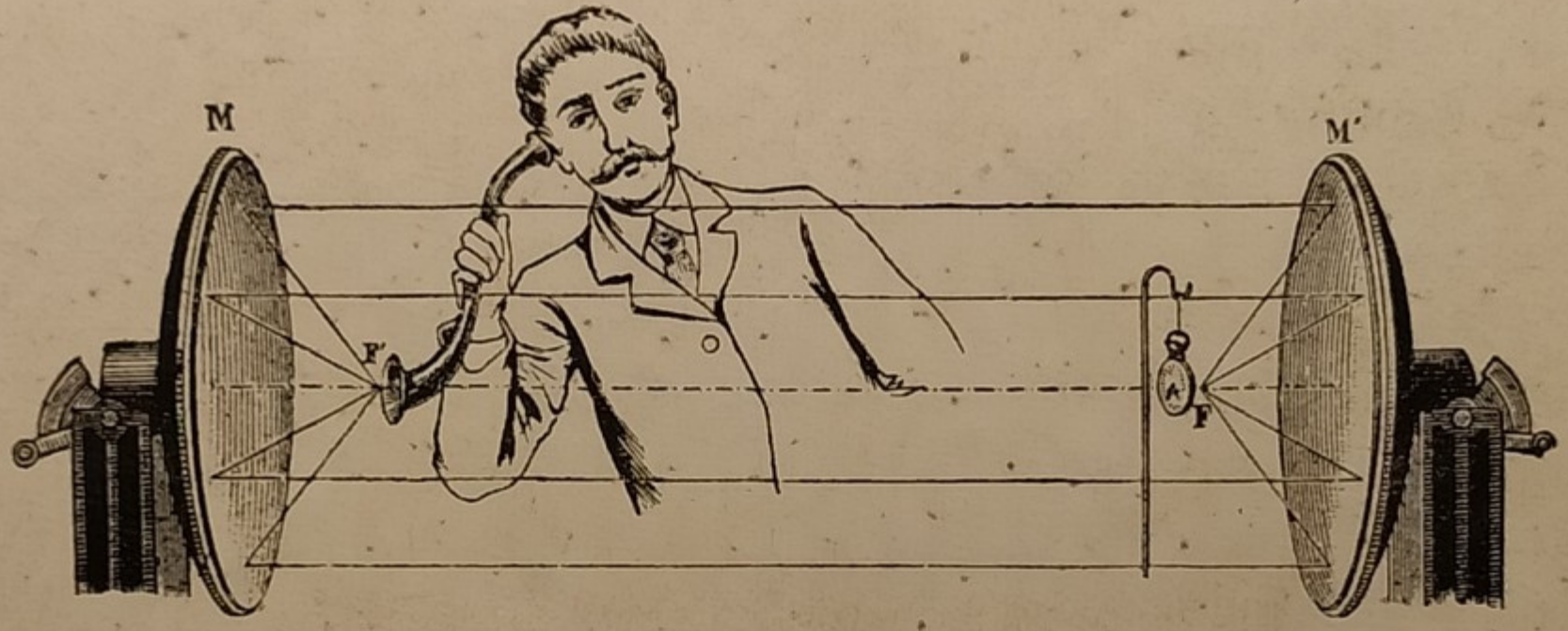

Fig. 335.

che colpiscono lo specchio vengono da questo riflessi parallelamente all'asse comune dei due specchi. Il secondo specchio *M* li riflette inviandoli nel proprio fuoco principale *F'*, dove sono raccolti sopra un piccolo schermo e vi disegnano una fiammella luminosa. Se alla candela si sostituisce un orologio da tasca, e si pone in *F'* l'orecchio o piuttosto il padiglione di un cornetto acustico (167), che intercetta meno i raggi riflessi dal primo specchio, si percepisce nettamente il tic-tac dell'orologio, che non viene percepito scostando il cornetto dal fuoco.

171. Eco. — Si chiama *eco* la ripetizione di un suono riflesso da un ostacolo, quale un muro, una roccia, ecc.

Supponiamo un osservatore *O* situato davanti a una superficie piana riflettente *MN* ad una distanza $AO = d$. Un suono emesso dalla persona, si propaga fino all'ostacolo, e da questo

viene riflesso come se provenisse dall'immagine O' (fig. 336). In tal modo il tempo che passa tra l'istante dell'emissione in O di un suono estremamente breve e l'istante in cui ritorna in O il movimento riflesso è $t = \frac{2d}{V}$, essendo $2d$ il tragitto fatto dal suono nell'andata e nel ritorno e V la velocità di propagazione del suono stesso.

Se il suono riflesso ritorna all'osservatore in un tempo più breve di $\frac{1}{10}$ di secondo, che è la durata media della *persistenza* di una sensazione sonora, la nuova sensazione prolunga semplicemente la prima, cioè quella che l'osservatore ha dal suono emesso. L'eco si ha soltanto se il suono impiega non meno di $\frac{1}{10}$ di secondo a percorrere lo spazio $2OA$; e poichè il suono nell'aria a 15° gradi percorre in $\frac{1}{10}$ di secondo 34 metri, OA deve superare 17 metri.

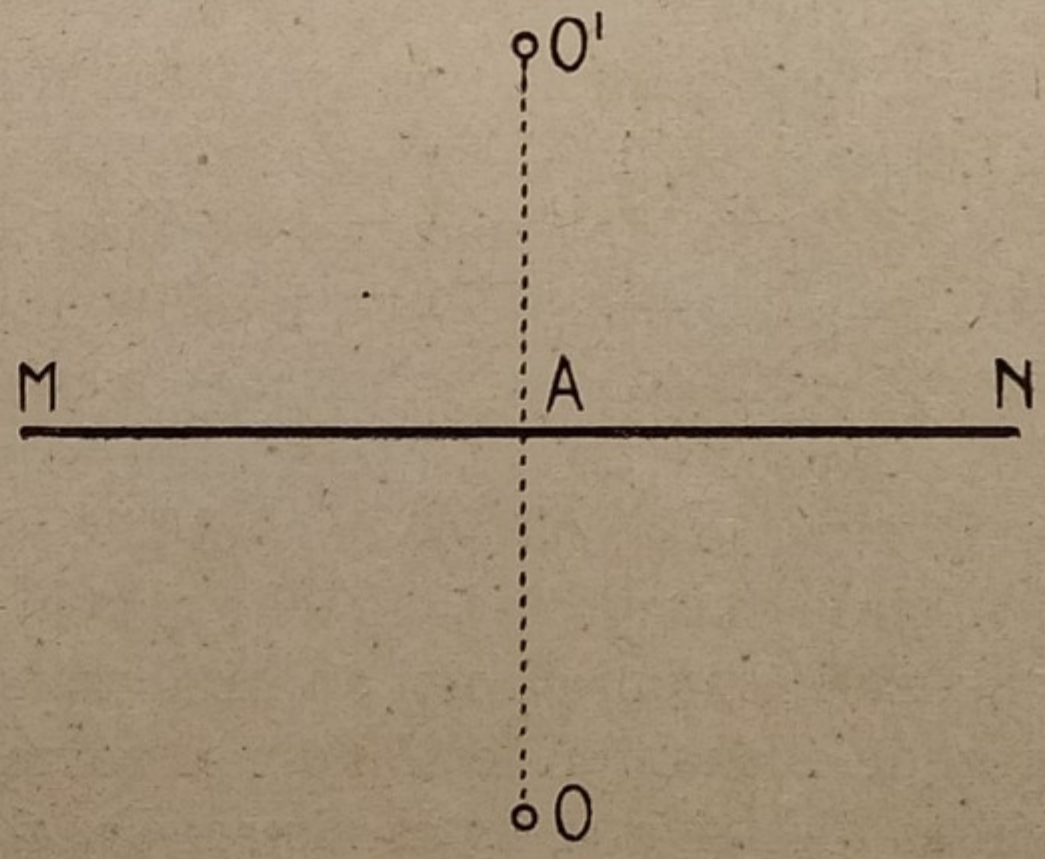

Fig. 336.

In conclusione un osservatore, situato a una distanza un po' superiore a 17 metri da un muro, percepirà l'eco, se emette un *suono estremamente breve.*

I suoni articolati esigono una distanza minima alquanto maggiore affinchè l'eco sia netta. Supposto che si percepiscano nettamente 4 sillabe al secondo, affinchè l'audizione di una sillaba riflessa segua immediatamente l'audizione della sillaba diretta, occorre che passi $\frac{1}{4}$ di secondo fra il principio del suono diretto e il principio del suono riflesso. La distanza OA deve essere quindi tale che sia $\frac{2OA}{V} = \frac{1}{4}$; in conseguenza, per l'aria, risulta $OA = 42^{m},5$. Se si pronunziano in tal condizione

più sillabe consecutive, le sillabe riflesse si sovrappongono, nell'orecchio, alle sillabe dirette, ed essendo quelle meno intense, vengono coperte da queste; solo l'ultima sillaba arriva sola, quando il suono diretto è cessato, e sembra ripetuta essa sola; si ha in tal modo l'eco *monosillabica.*

Se la distanza OA è eguale a n volte $42^{m},5$, si avrà la ripetizione di n sillabe, cioè si ha l'eco *polisillabica.*

Talora avviene che la stessa sillaba risulta ripetuta successivamente più volte, e si ha in tal caso l'eco *multipla.* Due muri paralleli alquanto distanti possono produrre l'eco multipla, nella stessa maniera che due specchi paralleli dànno delle immagini multiple. Famosa era l'eco della Simonetta, un vasto fabbricato poco lungi da Milano, che in seguito a modificazioni subìte ha perduto la sua prerogativa. Il fenomeno era prodotto da due muri paralleli, alle estremità di un cortile; un colpo di pistola, in aria calma veniva ripetuto più di 20 volte. Un fenomeno analogo si verifica nel Battistero di Pisa.

In una stanza di dimensioni ordinarie, il suono è riflesso dai muri, dal soffitto, dai mobili, che rinviano i suoni riflessi in tempi inapprezzabili, che perciò si confondono sillaba per sillaba coi suoni diretti e li rinforzano. Ma se la sala è alquanto grande i suoni riflessi non si sovrappongono esattamente ai suoni diretti e si ha il *rimbombo*, che può assumere nelle sale destinate ad audizioni musicali o nei teatri, caratteri da rappresentare uno dei più gravi inconvenienti. In tali casi si cerca di attenuare le riflessioni, coprendo i muri di drappi, sostanze non elastiche che spengono le vibrazioni.

Anche le nubi possono riflettere il suono: un colpo di cannone sparato in aperta pianura, con cielo sereno, è breve e secco; in presenza di nubi apparisce prolungato ed acquista il carattere del rombo del tuono.

Il rombo prolungato del tuono ha la stessa origine; l'esplosione della scarica atmosferica è un fenomeno pressochè istantaneo, ma appare come un suono prolungato per la riflessione delle onde sonore sulle nubi o sugli oggetti terrestri.

172. Percezione dei suoni; l'orecchio. — L'orecchio è l'organo atto alla percezione dei suoni (fig. 337). Esso è formato

di una parte esterna, che comprende il *padiglione* 1 e il *condotto auditivo* 2, atti a raccogliere e a dirigere le onde sonore fino alla membrana del timpano, che sta al fondo del condotto auditivo. Procedendo verso l'interno, dopo il timpano, si trova una cavità, che costituisce l'*orecchio medio*, nel quale si trova la *catena degli ossicini* — martello, incudine, osso lenticolare e staffa — poggianti, il primo sulla membrana del timpano, l'ultimo contro la membrana della *finestra ovale*, al di là della quale trovasi l'*orecchio interno*. Questo ha costituzione complessa: ci basti il dire che tra altri organi vi si trova un canale a forma di *chiocciola*, in cui, sopra una membrana nuotante in un liquido, stanno numerosissimi filamenti che sono le terminazioni del nervo acustico, destinato a trasmettere al cervello le sensazioni sonore.

Fig. 337.

In tal maniera le vibrazioni sonore arrivate al timpano vengono trasmesse all'orecchio interno dalla catena degli ossicini e l'eccitazione arriva ai filamenti di cui sopra si è detto. Pare che tali filamenti abbiano la proprietà di vibrare ciascuno con un determinato periodo, di guisa che, quando le onde vi arrivano, entrerebbero per risonanza (173) in vibrazione quei filamenti che corrispondono al periodo del suono trasmesso. Da tali filamenti le sensazioni attraverso il nervo acustico raggiungerebbero il cervello.

173. Fenomeni di risonanza. — Se si hanno due corpi sonori vicini capaci di dare lo stesso numero di vibrazioni, eccitandone uno, anche l'altro, quasi per simpatia, si mette in vibrazione senza essere eccitato da una causa apparente. L'esperienza si può eseguire in scuola disponendo sul tavolo un certo numero

di coristi, tutti diversi per numero di vibrazioni che son capaci di dare, tranne due che sono accordati.

Eccitando uno qualunque dei coristi, eccettuati i due ultimi, si ha una certa nota; se in seguito, poggiando la mano sul corista vibrante, lo si riduce al silenzio, si riscontra che tutti gli altri rimangono muti. Ma se si eccita uno dei due coristi accordati, fattolo subito tacere, si sente che la stessa nota è emessa dall'altro corista.

Non è difficile la spiegazione del fenomeno. Qualunque sia il corista che viene eccitato, esso dissemina nello spazio circostante la sua energia producendo nel mezzo le note onde, le quali evidentemente colpiscono tutti gli altri coristi, che così si mettono impercettibilmente a vibrare, ma le onde emesse dal corista vibrante imprimono a uno qualunque dei coristi non accordati, degli impulsi che non sono in accordo colle vibrazioni già iniziate dal corista stesso. Vale a dire, può essere che un certo impulso arrivi al corista nello stesso senso del suo movimento, ciò che ha per effetto di aumentarne momentaneamente l'ampiezza di vibrazione, ma gli impulsi che arrivano immediatamente dopo, percuotono il corista in senso contrario alle sue vibrazioni, ciò che porta al loro spegnimento.

Invece al corista che è accordato con quello già posto in vibrazione, gli impulsi arrivano successivamente tutti nello stesso senso del movimento già iniziatosi, e gli effetti di tali impulsi si sommano, sicchè il secondo corista acquista un'ampiezza di oscillazione notevole.

Il fenomeno si compie collo stesso meccanismo di altri che si incontrano nella vita ordinaria. Senza grande sforzo si può mettere in moto la massa pesante di una campana, purchè si dia alla corda degli strappi ad eguali intervalli, secondando il moto oscillatorio proprio della campana stessa. Nello stesso modo i muratori, per rovesciare un muro, lo urtano ad intervalli facendo nascere in esso delle oscillazioni via via crescenti, che essi secondano e che determinano la caduta.

Una sola persona, posta in mezzo ad un ponte sospeso, dando ai suoi sforzi un ritmo conveniente, potrebbe imprimergli delle oscillazioni pericolose. Per tal ragione si fa rompere il passo alla truppa che debba passare sopra un ponte sospeso; nel 1850

il ponte sospeso di Angers si ruppe sotto il passo cadenzato di un battaglione di soldati, dei quali 219 trovarono la morte.

Se invece tali urti si succedono ad intervalli non eguali alla durata delle vibrazioni proprie del corpo, questo resta quasi in riposo.

Vediamo ancora un altro fatto relativo alla risonanza acustica. Un corista vibrante viene accostato all'apertura di una provetta. La colonna d'aria contenutavi entrerà per conseguenza a vibrare, ma in generale debolmente, e il suono ne viene appena sensibilmente rinforzato (fig. 338).

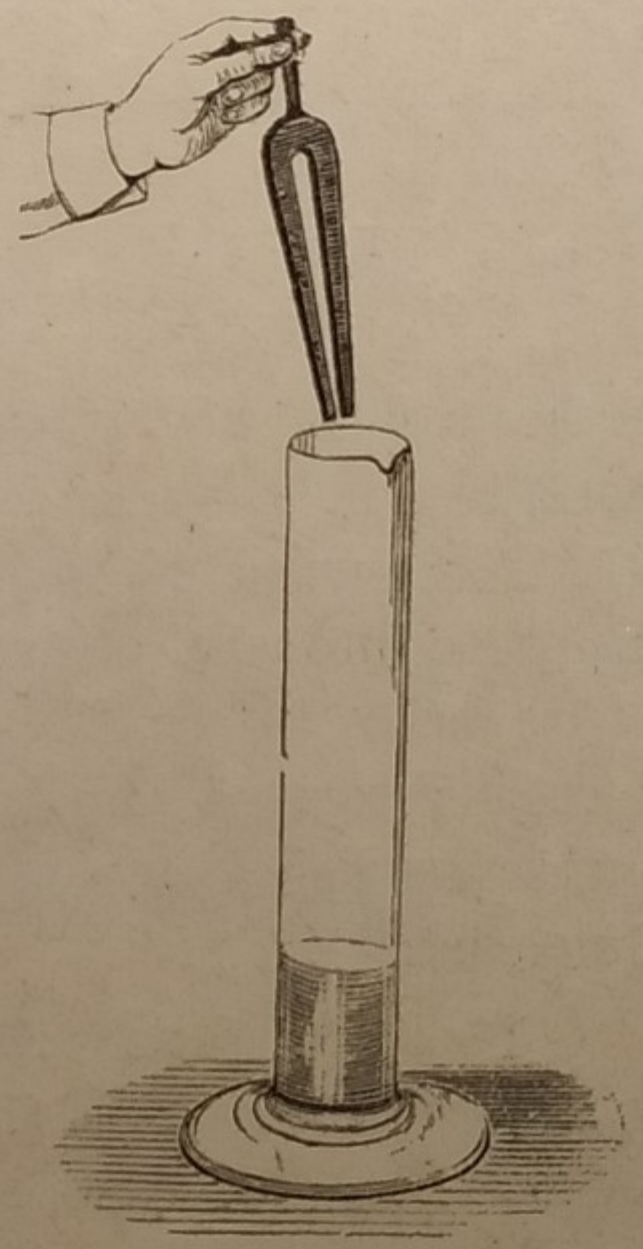

Fig. 338.

Se allora si versa lentamente dell'acqua nella provetta, con che si modifica la lunghezza della colonna d'aria, questa finirà per compiere delle vibrazioni assai ampie, e aggiungendo il suo suono a quello debole del corista si avrà un notevole rinforzo. In tale condizione la colonna d'aria vibra d'accordo col corista; e la teoria dimostra che il fenomeno acquista la massima intensità quando la colonna d'aria abbia una lunghezza eguale a $\frac{1}{4}$ della lunghezza d'onda corrispondente al suono del corista (165). Rinforzi, ma più deboli, si hanno anche per tutti gli altri valori della colonna d'aria eguali a un numero dispari di quarti d'onda.

I tubi sonori, come si vedrà più innanzi, emettono suoni per risonanza. Le casse di risonanza di cui son forniti tutti gli strumenti a corda utilizzano lo stesso fenomeno.

Un corista vibrante sostenuto colla mano dà un suono assai debole, ma lo dà assai più intenso quando venga montato su una cassa di risonanza, come quello della figura 317, e il rinforzo massimo si ha quando la lunghezza della cassa equivale a un quarto della lunghezza d'onda del suono emesso dal corista; e finiamo col dire che nelle radiotrasmissioni viene largamente

sfruttato il fenomeno di risonanza elettrica sotto il nome di *sintonia*.

174. Fenomeni d'interferenza - Battimenti. — Non è raro il caso che nello stesso mezzo si propaghino contemporaneamente più sistemi di onde generate da diverse sorgenti. Una molecola del mezzo riceverà allora degli impulsi contemporanei, ma si potrà sempre determinare il suo moto risultante servendoci del principio della composizione dei movimenti. Vediamone qualche caso.

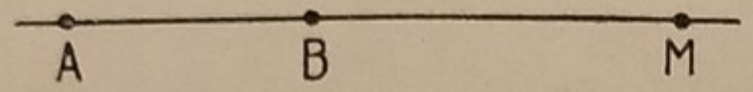

Fig. 339.

Sieno A e B (fig. 339) due sorgenti sonore, che considereremo come due punti vibranti colla stessa ampiezza, collo stesso periodo e nella *stessa fase*, cioè tali che passano per la posizione di riposo nello stesso istante con velocità dello stesso segno. Esaminiamo che cosa succede di una molecola M del mezzo posta sulla retta AB da una stessa parte delle due sorgenti.

Le vibrazioni di A viaggiano sole fino in B e da questo punto in poi si accompagnano con quelle di B. Consideriamo due casi:

1° La distanza AB contenga un numero intero di volte la lunghezza d'onda (165) che corrisponde al suono delle due sorgenti; in tal caso le vibrazioni di A giunte in B trovano quelle di B effettuantisi nella *stessa fase*, e accompagnandosi con queste arrivano in M imprimendo a questa molecola due impulsi dello stesso segno, e per conseguenza M è costretta a compiere delle vibrazioni della stessa frequenza di quelle delle due sorgenti, ma di ampiezza maggiore di quella che compirebbe se fosse investita dalle vibrazioni di una sola sorgente.

2° La distanza AB contenga un numero dispari di mezze lunghezze d'onda del suono delle sorgenti; per conseguenza le vibrazioni di A giunte in B vi trovano le vibrazioni di B in *opposizione di fase*, cioè con velocità opposta, e il punto M riceverà perciò degli impulsi che hanno in ogni istante segno contrario. Se i due sistemi di vibrazioni arrivanti in M non hanno la stessa ampiezza, M compirà vibrazioni della stessa frequenza delle due sorgenti con un'ampiezza eguale alla

differenza delle due ampiezze degli impulsi ricevuti; che se questi hanno la stessa ampiezza, M resterà in riposo. Concludendo, si avrà dunque in M, secondo i vari casi, o movimento esaltato, o movimento ridotto, o silenzio.

Questi fenomeni si comprendono sotto il nome di *interferenza sonora*, e si possono verificare ricorrendo a facili disposizioni sperimentali. L'apparecchio della figura 340 serve allo

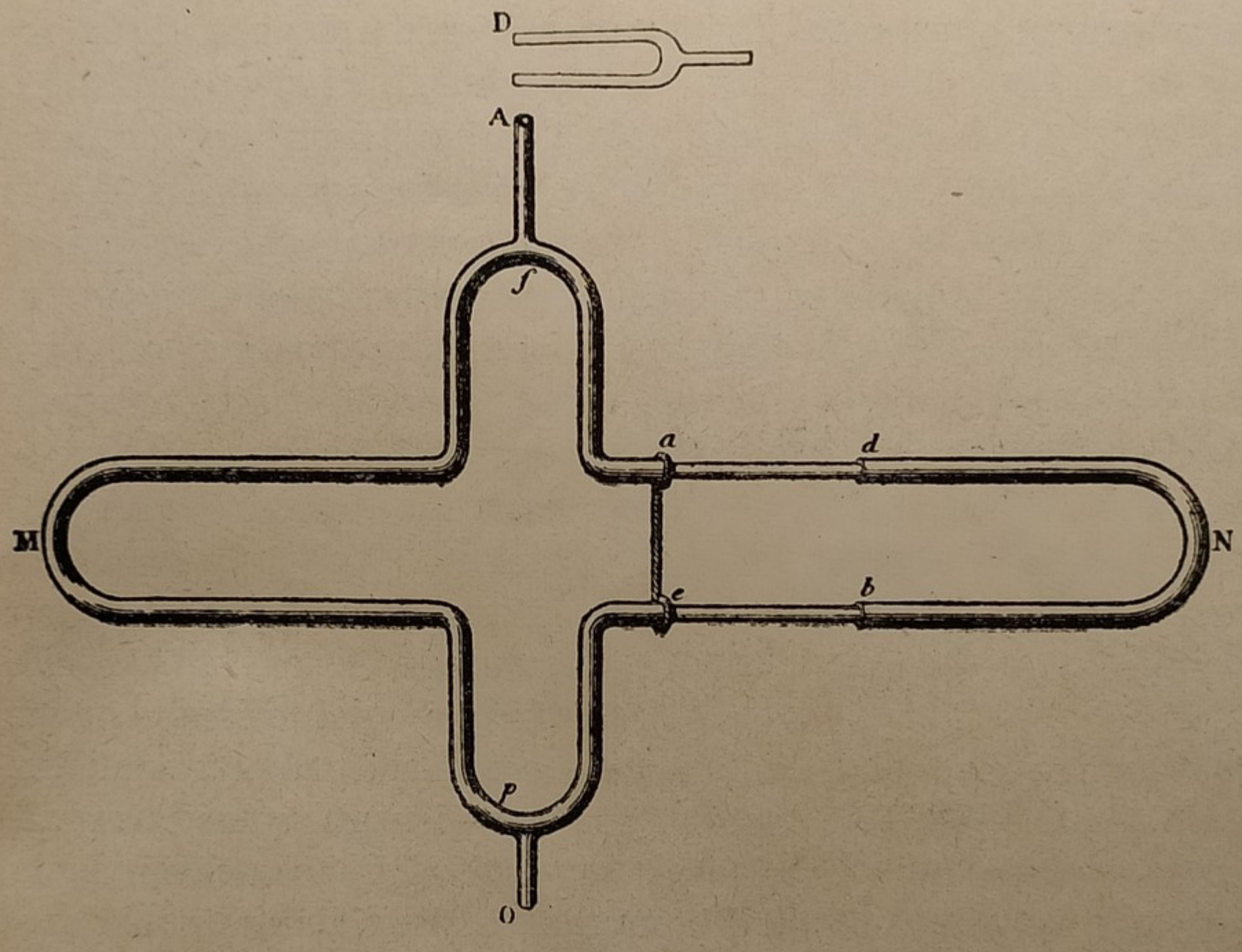

Fig. 340.

scopo. Un corista D è posto davanti all'imboccatura A; il suono giunto in f prende due vie diverse, una fMO, l'altra fNO. Così sono realizzati due sistemi d'onde che hanno i caratteri di quelli sopra considerati. Se i due cammini sono eguali o differiscono fra loro di un numero intero di lunghezze d'onda, il moto in O risulta rinforzato, e un orecchio posto in quel punto ode un suono di notevole intensità. Ma se la differenza dei due cammini è eguale a un numero dispari di mezze onde, in O si ha l'annullamento o quasi del moto, e l'orecchio non percepisce alcun suono. Le due condizioni vengono facilmente

realizzate impegnando più o meno il tratto curvo *dNb* sopra i tratti fissi *a* ed *e*.

Se il corista dà 435 vibrazioni complete al secondo, la lunghezza d'onda nell'aria è:

$$\frac{340}{435} = 0^m,782 .$$

Un'esperienza anche più semplice può verificare le proposizioni sopra enunciate. Eccitiamo un corista staccato dalla sua cassetta di risonanza (175) e accostiamolo all'orecchio facendolo girare fra le dita attorno al suo asse mantenuto verticale. Si riscontrano quattro regioni dove il suono è più intenso e quattro intermedie dove si annulla quasi completamente. Nella figura 341 i rettangoli *A* e *B* rappresentano le estremità delle branche del corista le quali, com'è noto (171), hanno in ogni istante velocità eguali e di segno contrario. Nelle regioni *c* ed *e* gli impulsi comunicati all'aria non si elidono che parzialmente, perchè una delle branche maschera l'altra. In *f* e *d* gli impulsi arrivano in concordanza di fase, e qui appunto si ode il suono coll'intensità massima; in corrispondenza delle linee punteggiate invece gli impulsi arrivano in opposizione di fase, e si ha perciò il silenzio.

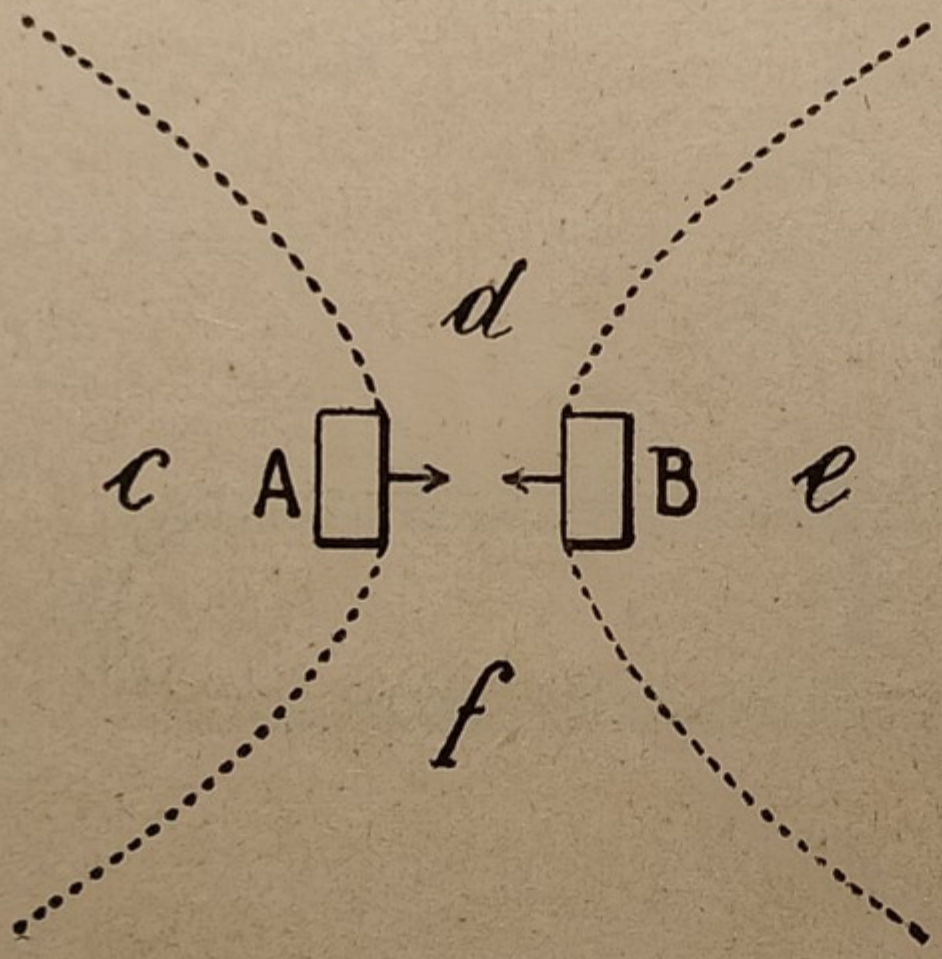

Fig. 341.

Il fenomeno dei *battimenti* si compie con un meccanismo, si può dire, identico a quello dei fatti ora studiati. Si può fare una facilissima esperienza: facendo vibrare contemporaneamente due coristi perfettamente accordati, si sente un suono unico e continuo; ma se a uno dei rebbi di un corista appiccichiamo una pallottolina di cera, il suono di questo corista riesce leggermente più grave, e facendo vibrare contempo-

raneamente i due coristi non si ode più un suono continuo, ma un alternarsi di rinforzi e di indebolimenti del suono. La ragione è semplicissima: supponiamo che il corista non alterato compia 302 vibrazioni complete al secondo e l'altro 300. Ad un dato istante arrivano all'orecchio dai due coristi impulsi dello stesso senso e si ha quindi un rinforzo del suono; ma passato $^1/_4$ di secondo, il 1° corista avrà compiuto 75 $^1/_2$ vibrazioni complete e il 2°, 75; perciò in tale istante all'orecchio arrivano gli impulsi in opposizione di fase e si ha quindi una diminuzione di intensità. Dopo $^1/_2$ secondo, il 1° corista avrà eseguito 151 vibrazioni e l'altro 150, quindi in tale istante l'orecchio percepisce un rinforzo, perchè riceve i due impulsi nella stessa fase. Seguendo tale ragionamento si riscontra che dopo $^3/_4$ di secondo si manifesta il 2° affievolimento e a 1 secondo il 2° rinforzo e così di seguito. Verificandosi dunque le condizioni suaccennate, si hanno durante ogni secondo due rinforzi e due indebolimenti. Tali rinforzi e indebolimenti alternati si dicono *battimenti*; e si capisce che il loro numero è eguale alla differenza delle frequenze dei coristi. Aumentando tale differenza, i battimenti divengono più fitti e se il loro numero rientra nei limiti delle frequenze audibili (163), non appariscono all'orecchio staccati l'uno dall'altro, ma acquistano il carattere di un vero e proprio suono, detto *suono dei battimenti*.

Si trae profitto del fenomeno esposto per accordare perfettamente due corde d'uno strumento sonoro. Un orecchio, per poca educazione musicale che possegga, sente bene la differenza di altezza dei suoni di due corde quando le loro frequenze sieno alquanto diverse; invece la differenza può sfuggire quando sono quasi all'unisono; ma allora, facendo vibrare contemporaneamente le due corde, entrano in azione i battimenti, che riescono più facilmente audibili quanto più son radi, cioè quanto minore è la differenza delle frequenze che corrispondono alle due corde. Basta allora modificare leggermente la tensione di una delle corde perchè i battimenti diventino sempre più radi fino a sparire completamente; le corde sono allora perfettamente all'unisono.

In ordine ai suoni dei battimenti, che alcuni anche chiamano suoni del Tartini, nostro celebre violinista, al quale se ne attri-

buisce la scoperta, va notato che in causa della loro grande intensità bisogna tenerne conto nella musica e vedere se si accordano con gli altri suoni. La perfetta consonanza dei quattro suoni che formano l'accordo perfetto maggiore, che hanno frequenze come i numeri 4 : 5 : 6 : 8, è dovuta al fatto che i battimenti ottenuti, accoppiando due a due tali note, hanno frequenze che stanno fra loro come 1 : 2 : 3 : 4. Questi suoni rinforzano e s'accordano coi suoni originari, ciò che conferisce a dare all'accordo un carattere aperto.

Invece nell'*accordo perfetto minore* fatto di quattro note le cui frequenze stanno fra loro come i numeri 10 : 12 : 15 : 20, i suoni dei battimenti non rinforzano tutti i suoni dati, anzi qualcuno stona con essi. Da qui il carattere inquieto e indeciso di tale accordo, che si adatta ad esprimere sentimenti di tal natura.

E notiamo ancora un fatto che può sembrare paradossale, ma che dopo il già detto è spiegabilissimo. Se si riesce a produrre contemporaneamente due serie di vibrazioni di frequenze superiori alle frequenze audibili, per es., una di 500 mila e l'altra di 501 mila, si hanno 1000 battimenti al secondo, quindi un suono audibile. Negli apparecchi radioriceventi il fenomeno è largamente utilizzato.

175. Vibrazioni delle corde. — Una corda è un filo di metallo o di minugia, fisso agli estremi e teso; tirandola perpendicolarmente alla sua lunghezza o strofinandola nella stessa direzione mediante un archetto, la corda vibra rapidamente da una parte e dall'altra della sua posizione rettilinea di riposo, essa cioè compie delle vibrazioni *trasversali*.

Le leggi delle vibrazioni di una corda sono date dalla seguente formola dedotta con un ragionamento matematico:

$$N = \frac{1}{2rl}\sqrt{\frac{Pg}{\pi d}};$$

N è il numero delle vibrazioni complete al secondo eseguite dalla corda che vibra *in tutta la sua lunghezza*, e che dà quindi il suono più grave che può dare; P è il peso tensore in grammi, g l'accelerazione della gravità, d la densità, l la lunghezza ed r il raggio della corda; l, r e g vanno misurati in centimetri.

Dalla formola si scorge dunque che la frequenza delle vibrazioni è *inversamente proporzionale alla lunghezza e al diametro, direttamente proporzionale alla radice quadrata del peso tensore, e inversamente proporzionale alla radice quadrata della densità.*

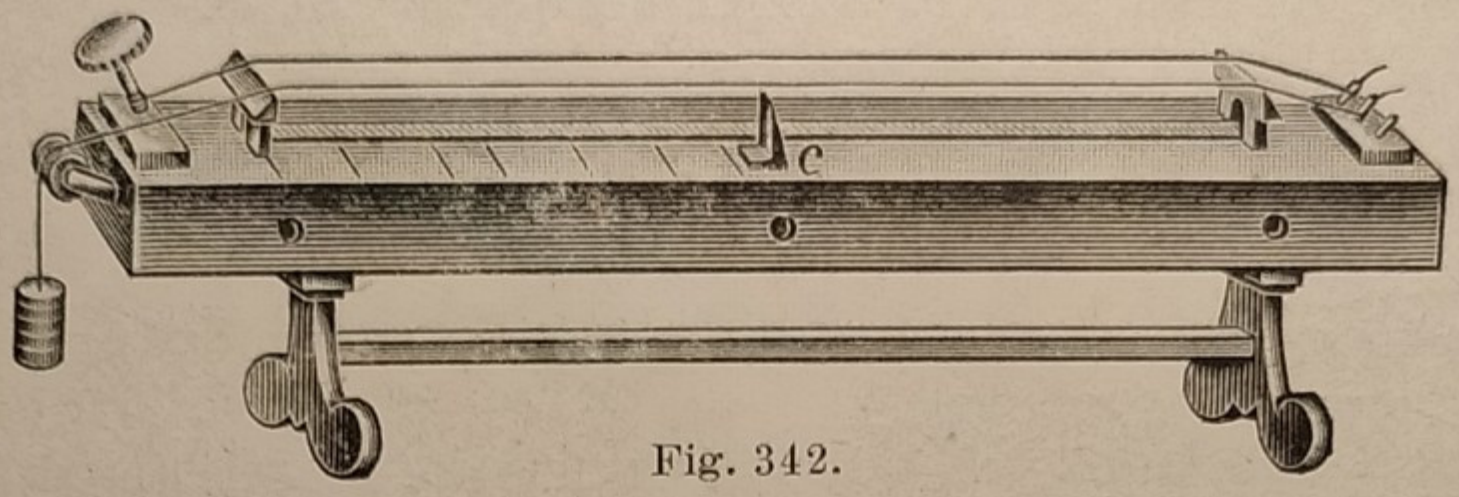

Fig. 342.

La verifica sperimentale si fa col sonometro (fig. 342). Esso è fatto di una lunga cassetta rettangolare di legno di abete destinata a rinforzare i suoni.

Sulla faccia superiore sono tese due o tre corde fissandole alle due estremità, e passandole sopra due ponticelli distanti fra di loro 1 metro. La tensione si ottiene o con una chiave, simile a quella usata per accordare i pianoforti, o con un peso mediante una puleggia. La lunghezza vibrante si può variare premendo col dito la corda sopra il terzo ponticello mobile *c*.

A complemento dei cenni fatti sulle vibrazioni delle corde, diremo due parole sulle vibrazioni delle *verghe* e delle *lastre*.

Le verghe sono asticelle di sezione sufficientemente grande rispetto alla lunghezza da poter vibrare fissandole solo a un estremo.

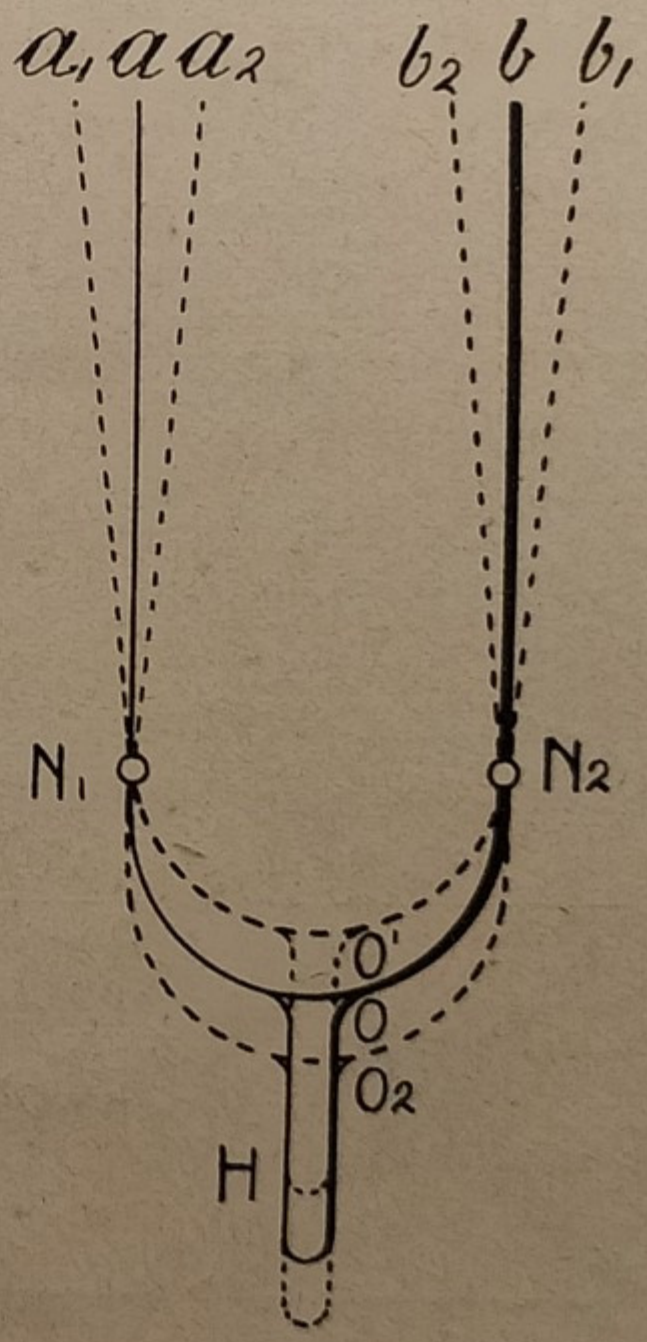

Fig. 343.

Il *diapason* o *corista* è una forcella che si può ritenere come una verga piegata ad **U**. Esso ha la forma *aOb*. quando è fermo (fig. 343), e mentre vibra acquista alternativamente le forme $a_1O_1b_1$ e $a_2O_2b_2$; con ciò il punto O compie un movimento da O_1 a O_2 e tale movimento viene comunicato alla colonnina

supporto H, di guisa che poggiando questa contro un tavolo vi produce dei piccoli colpi che hanno la frequenza delle vibrazioni dei rebbi. Con ciò anche il tavolo entra in vibrazione per risonanza e il suono ne risulta rinforzato.

Si nota che il corista in vibrazione presenta due punti $N_1 N_2$ che rimangono quasi assolutamente fermi, detti *nodi*.

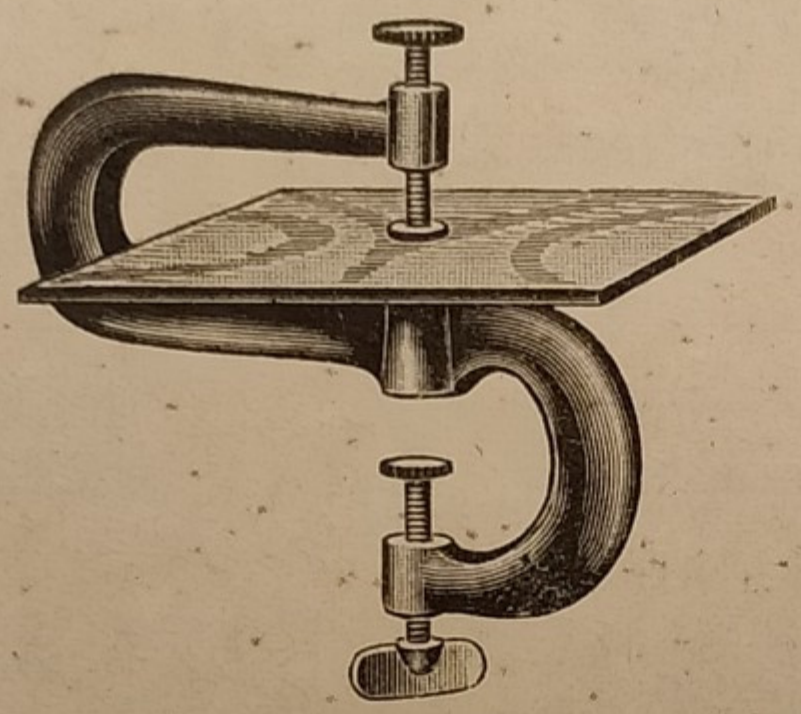

Fig. 344.

Una *lastra* fissata in un sol punto, eccitata in un punto del suo contorno con un archetto da violino, si mette in vibrazione e dà un suono. Ma il moto da essa assunto è più o meno complicato a seconda della posizione del punto dove viene eccitata e della posizione di certi punti del contorno che si possono fissare colle dita.

Con una lastra quadrata di spessore uniforme, di vetro o meglio di bronzo, fissata nel suo punto di mezzo con una adatta morsetta (fig. 344), si possono ottenere diversi suoni.

Cospargendo di fine sabbia la lastra, mentre questa vibra, si vedrà la sabbia vivamente saltellare in certe regioni dove il moto ha la massima ampiezza — *ventri* —, e raccogliersi in certe regioni dove l'ampiezza è minima — *nodi* —. Appariscono in tal modo delle graziose figure, dette *figure di Cladny*. Faci-

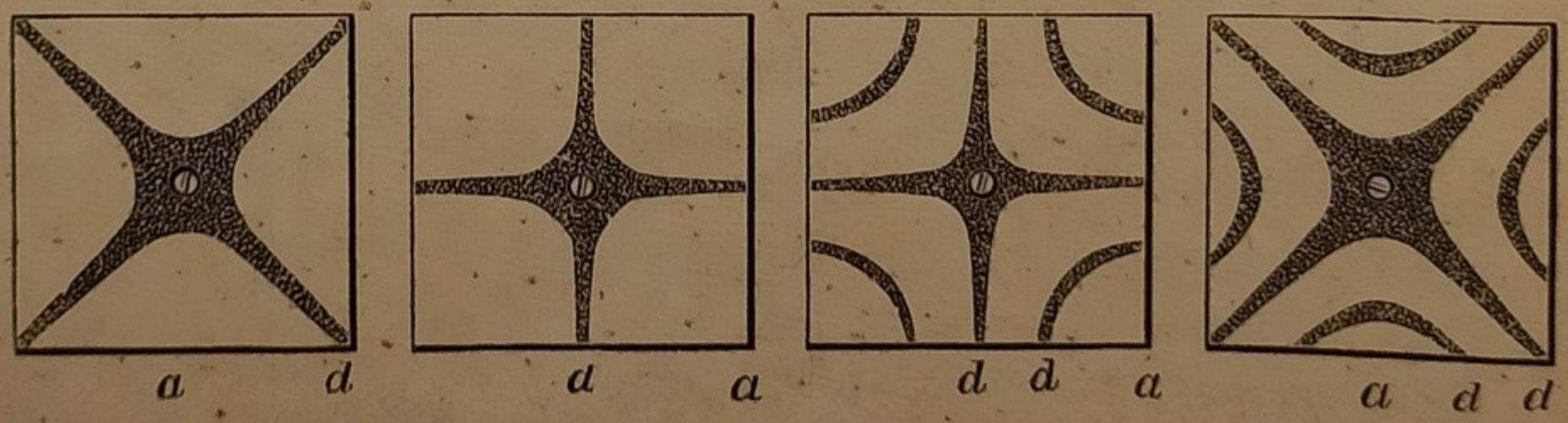

Fig. 345.

lissimo è l'ottenere le quattro forme della fig. 345, nelle quali con a è indicato il punto del contorno eccitato dall'archetto, e con d i punti immobilizzati coll'appoggio delle dita.

176. Vibrazioni dei tubi. — Sono essi dei tubi a pareti resistenti e liscie, che dànno un suono quando l'aria contenutavi si metta in vibrazione.

L'agitazione dell'aria può essere prodotta da una sorgente, le cui forme si possono ridurre a due tipi: *imboccatura a flauto* e *imboccatura ad ancia*.

Del primo tipo sono il flauto e buona parte dei tubi d'organo. In questi l'aria viene da un mantice, attraversa un tubo tronco-conico *P*, detto *piede*, e arriva in una camera, che nella parte superiore si apre in una fenditura assai stretta *o* detta *luce* (fig. 346). La lamina d'aria che esce da *o* si frange contro il *labbro* superiore *s* tagliato a coltello, che forma il bordo superiore di una finestra rettangolare trasversale *l* detta *bocca*, e produce un rumore continuo, cioè un miscuglio di moltissimi suoni, tra cui si trovano quelli che la colonna d'aria, contenuta nel tubo, potrà rinforzare secondo i principî della risonanza. Questi soli suoni, rinforzati dal tubo, risultano sensibili e dentro il tubo le vibrazioni dell'aria si compiono nella direzione dell'asse, sono cioè vibrazioni longitudinali. Un'analisi però del fenomeno dimostra che in corrispondenza della bocca del tubo l'aria conserva sempre la densità dell'aria esterna, essendo che in tale regione essa può liberamente muoversi; alla bocca del tubo, come si dice, si forma sempre un *ventre*. Alla estremità superiore si forma anche un ventre se il tubo è aperto; ma se è chiuso, vi si forma un *nodo*; qui l'aria, ostacolata nei suoi movimenti, è alternativamente condensata e rarefatta; essa in corrispondenza di un nodo esercita sulle pareti una pressione alternativamente variabile superiore o inferiore a quella esterna, dimodochè se si pratica un foro nella parete dove c'è un nodo, l'aria acquista piena libertà di movimento mantenendo costantemente la pressione esterna, il nodo si distrugge

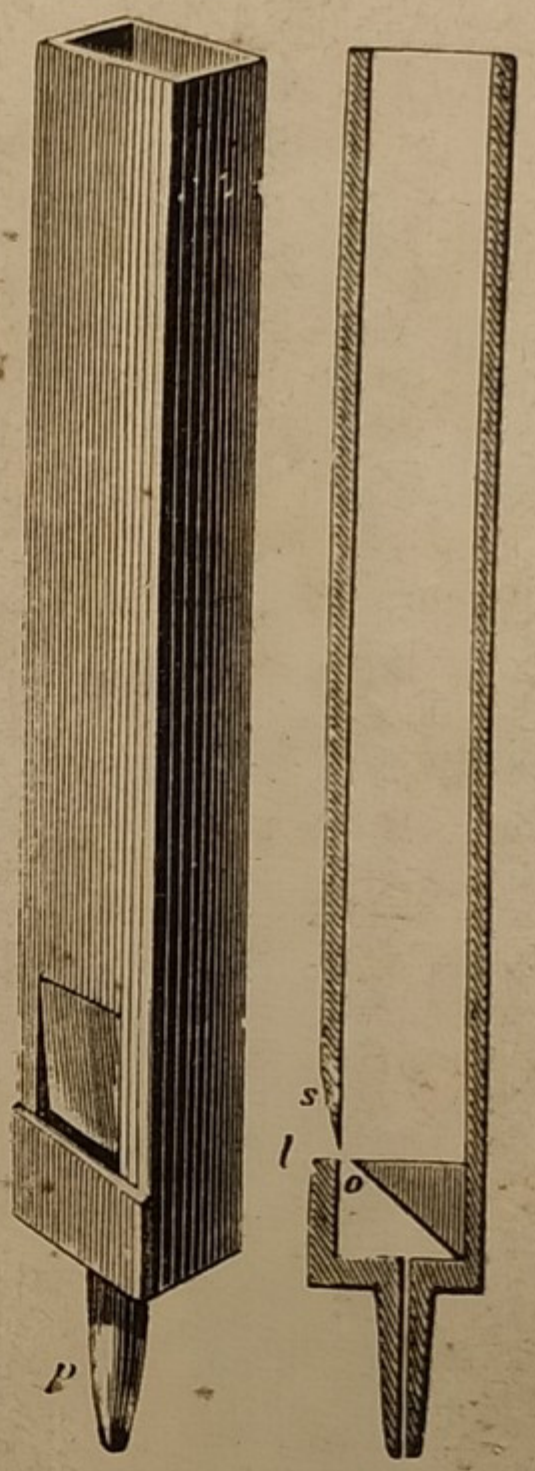

Fig. 346.

e vi si forma un ventre. Questa discussione spiega la funzione delle *chiavi* di molti strumenti a fiato, il flauto, il clarinetto ecc. L'apertura di una chiave in corrispondenza di un ventre, dove, come si disse, l'aria interna mantiene la densità normale, non modifica affatto il suono, ma lo modifica se è in corrispondenza di un nodo, perchè quivi dovendosi formare un ventre dovrà variare la distribuzione e il numero dei ventri e dei nodi interni. Tale distribuzione e numero può anche variare se varia la pressione della corrente d'aria iniettata nel tubo.

Fig. 347.

Diamo qui le leggi delle vibrazioni nei tubi:

1° *Un tubo, aperto o chiuso che sia, con la minima corrente d'aria capace di farlo risuonare, dà un suono massimamente grave detto fondamentale, il cui numero di vibrazioni è inversamente proporzionale alla lunghezza del tubo.*

2° *Un tubo aperto, coll'aumento graduale della pressione dell'aria, può dare, dopo il fondamentale, gli armonici successivi.*

3° *Un tubo chiuso, coll'aumentare della pressione d'aria, può dare dopo il fondamentale solo gli armonici di posto dispari.*

4° *Un tubo chiuso dà lo stesso suono fondamentale di un tubo aperto di lunghezza doppia.*

Quest'ultima legge si verifica col tubo della figura 347 che è aperto, ma a metà porta una piccola saracinesca che permette di aprirlo o chiuderlo in quel punto. Facendo dare al tubo il suono fondamentale, questo non muta aprendo o chiudendo la saracinesca.

Per intendere completamente le leggi esposte occorre sapere che son detti *armonici* i suoni le cui frequenze stanno fra loro come la serie dei numeri naturali 1, 2, 3...

177. Intervalli musicali. — La percezione simultanea o successiva di due suoni produce sul nostro orecchio una impres-

sione che non dipende dalla loro altezza assoluta, ma dal loro *intervallo*.

Se si producono quattro suoni, tali che l'intervallo fra i due primi A e B sia *giudicato dall'orecchio* eguale a quello fra gli altri due A' e B', si rileva, misurando la frequenza delle vibrazioni a, b, a', b' che corrispondono ai quattro suoni, che il rapporto $\frac{a}{b}$ è eguale al rapporto $\frac{a'}{b'}$. Perciò in Acustica si chiama *intervallo fra due suoni il rapporto delle loro frequenze, ossia dei numeri di vibrazione per secondo.* È invalso l'uso di prendere per numeratore il numero delle vibrazioni del suono più acuto, con che un intervallo è sempre espresso da un numero superiore ad uno.

Il nostro orecchio è gradevolmente impressionato da due suoni successivi o simultanei, solo quando i loro intervalli siano dei rapporti semplici. Perciò i suoni musicali formano delle serie nelle quali entrano solo degli intervalli particolari.

I musici apprezzano il valore degli intervalli ad orecchio, i Fisici misurando, coi metodi esposti, i numeri delle vibrazioni.

L'emissione simultanea di due o più suoni, separati da intervalli musicali, dà un *accordo*.

L'accordo è *consonante* se produce una sensazione gradevole all'orecchio, altrimenti è *dissonante*. Il numero degli intervalli consonanti è assai ristretto: il più consonante è l'*unisono* $= \frac{1}{1}$; poi vengono l'intervallo di *ottava* $= \frac{2}{1}$; di *quinta* $= \frac{3}{2}$; di *quarta* $= \frac{4}{3}$; di *terza maggiore* $= \frac{5}{4}$; di *terza minore* $= \frac{6}{5}$.

Due suoni formano un accordo armonioso quando il loro intervallo è misurato da numeri interi molto piccoli.

Quattro suoni i cui numeri di vibrazione stanno come 4 : 5 : 6 : 8 formano il così detto accordo *perfetto maggiore*; se i numeri di vibrazione stanno come 10 : 12 : 15 : 20 si ha l'*accordo perfetto minore*.

178. Scale musicali. — La *scala* o *gamma* musicale è una successione di suoni di determinata altezza, cioè tali i cui numeri di vibrazione stanno fra loro secondo determinati rapporti.

La *scala naturale* comprende 7 suoni principali, i cui numeri di vibrazione stanno fra loro come:

$$1 : \frac{9}{8} : \frac{5}{4} : \frac{4}{3} : \frac{3}{2} : \frac{5}{3} : \frac{15}{8} ;$$

il più grave di questi si dice *fondamentale*. Il numero delle vibrazioni del primo è del tutto arbitrario, l'impressione che la scala determina sull'orecchio è da tal numero indipendente.

I nomi di tali suoni si dicono *note* e sono, in ordine ai rapporti segnati:

do, *re*, *mi*, *fa*, *sol*, *la*, *si* .

Queste note entrano a formare un'*ottava*, e siccome la scala può estendersi dalle due parti, cioè si possono avere diverse ottave, le note di queste sono contrassegnate con indici diversi. Così avremo un'ottava con le note:

$$do_1,\ re_1,\ mi_1,\ fa_1,\ sol_1,\ la_1,\ si_1 ;$$

l'ottava seguente comprenderà le note:

$$do_2,\ re_2,\ mi_2,\ fa_2,\ sol_2,\ la_2,\ si_2 ;$$

e quella precedente le note:

$$do_{-1},\ re_{-1},\ mi_{-1},\ fa_{-1},\ sol_{-1},\ la_{-1},\ si_{-1} .$$

Le note che fanno parte della musica costituiscono circa 8 ottave a partire dal do_{-2}, dato dalla canna più grande dell'organo e corrispondente a 16,31 vibrazioni complete al secondo, fino al re_7. I pianoforti si estendono dal la_{-2} al do_7. L'estensione della voce umana raramente oltrepassa due ottave.

Siccome poi l'orecchio apprezza benissimo degli intervalli anche minori di quelli esistenti fra le note sopra esposte, si è sentito il bisogno di arricchire la serie aggiungendovi i *be-*

molli e i *diesis*, cioè delle note che sono un po' più basse o un po' più alte di quelle sopra citate, nel rapporto di 25 a 24.

Per esempio il *do diesis* — *do* ♯ — *ha* $\frac{25}{24}$ delle vibrazioni che competono al *do*, il *re bemolle* — *re* ♭ — ne ha $\frac{24}{25}$ di quante ne ha il *re*.

Questa è la scala naturale seguita da chi non è iniziato agli studi musicali, e canti ingenuamente senza essere accompagnato da alcun strumento. Ma per certe esigenze di tecnica musicale e particolarmente per non essere costretti a complicare enormemente la struttura degli strumenti a suoni fissi, quali il piano, l'organo e l'armonium, si segue generalmente la scala *temperata*.

Essa si ottiene dividendo l'intervallo di ottava $= \frac{2}{1}$, in 12 intervalli eguali, detti *semitoni*, ciascuno dei quali ha perciò il valore di:

$$\sqrt[12]{2} = 1{,}05946\ .$$

Elenchiamo qui sotto le 13 note che comprendono l'intervallo di ottava, segnandone i numeri d'ordine, i nomi e il valore dell'intervallo di ciascuna con la fondamentale.

1ª	do_1	1	7ª	$fa\sharp = sol\flat$	$\left(\sqrt[12]{2}\right)^6$
2ª	$do\sharp = re\flat$	$\sqrt[12]{2}$	8ª	sol	$\left(\sqrt[12]{2}\right)^7$
3ª	re	$\left(\sqrt[12]{2}\right)^2$	9ª	$sol\sharp = la\flat$	$\left(\sqrt[12]{2}\right)^8$
4ª	$re\sharp = mi\flat$	$\left(\sqrt[12]{2}\right)^3$	10ª	la	$\left(\sqrt[12]{2}\right)^9$
5ª	mi	$\left(\sqrt[12]{2}\right)^4$	11ª	$la\sharp = si\flat$	$\left(\sqrt[12]{2}\right)^{10}$
6ª	fa	$\left(\sqrt[12]{2}\right)^5$	12ª	si	$\left(\sqrt[12]{2}\right)^{11}$

13ª $do_2 \left(\sqrt[12]{2}\right)^{12} = 2\ .$

In tal modo nella tastiera del piano si hanno 12 tasti per ciascuna ottava, 7 bianchi e 5 neri (fig. 348).

Ci basta di aver toccato l'argomento delle scale musicali senza estenderci in ulteriori considerazioni, accessibili solo a chi ha speciali attitudini e conoscenza della musica.

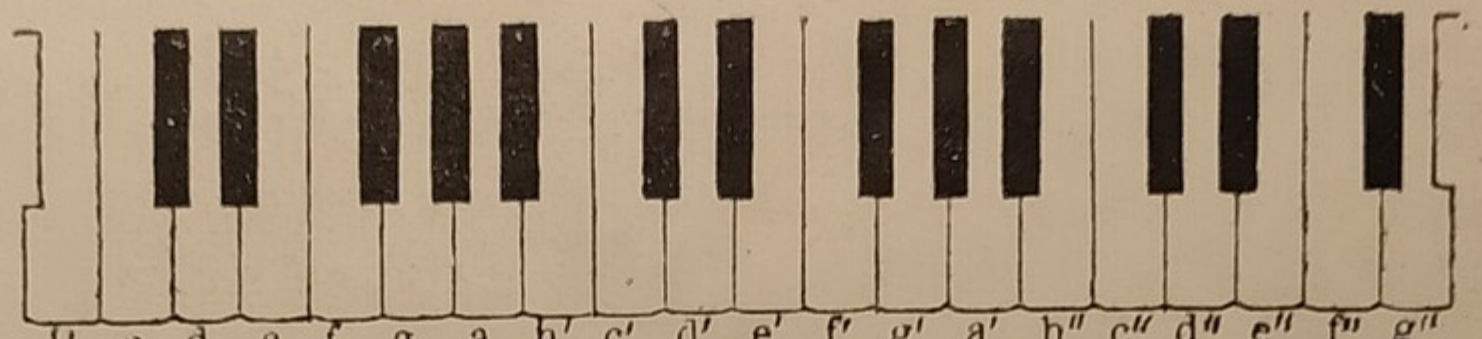

Fig. 348.

Finiamo questi cenni col dire poche parole sugli *armonici*, i cui numeri di vibrazione, come si è detto, stanno fra loro come la serie naturale dei numeri interi 1, 2, 3, 4, 5... Perciò se il 1° armonico è chiamato do_1, la serie è così disposta:

1	2	3	4	5	6	7	8.....
do_1	do_2	sol_2	do_3	mi_3	sol_3	$si\flat_3$	do_4.....

Gli armonici godono in musica di una importanza speciale; in modo particolare già sappiamo che essi intervengono a formare il timbro dei suoni (168). Nella breve esposizione fatta delle scale musicali abbiamo soltanto parlato di rapporti fra i numeri delle vibrazioni. Quanto al valore assoluto di questi numeri la cosa sarebbe indifferente se si trattasse di un pezzo di musica sonato da un solo strumento o cantato da una sola voce; infatti un pezzo di musica non muta sostanzialmente venendo cantato dalla voce grave del basso o dalla voce acuta del soprano.

Ma se si vogliono eseguire dei pezzi a più voci o con più strumenti, è chiaro che bisogna prendere le mosse da un punto di partenza comune, cioè accordare tutti gli strumenti con una stessa nota di altezza determinata. La nota da tutti adottata è il la_3, che corrisponde a 435 vibrazioni complete al secondo, ed è data da un corista che si chiama perciò corista o diapason *normale*.

Per l'Italia il corista normale è conservato nell'Istituto Fisico dell'Università di Roma, al quale si può ricorrere quando interessi di far eseguire dei controlli esatti.

179. Tipi principali di strumenti musicali. — Faremo una breve rassegna solo degli strumenti, diremo così classici, e che hanno più diretta dipendenza dalle leggi dell'Acustica.

Si possono dividere in due categorie: *a corda*, e *a fiato* (ad aria). Fra i primi troviamo:

a) il *piano* con corde di acciaio tese, in generale in gruppi di tre, per aver suoni più pieni, montate sopra una cassa di risonanza. Le tre corde di ogni gruppo sono fra loro perfettamente accordate e vengono simultaneamente percosse da un martello, azionato dal dito che preme il rispettivo tasto della tastiera. Secondo che le corde sono disposte orizzontalmente o verticalmente, si ha il *piano a coda* e il *piano verticale*; il primo è certo assai più ingombrante ma dà suoni di una potenza insuperabile;

b) il *violino* ha 4 corde, che eccitate con l'archetto possono dare una serie estesissima di suoni, limitando, mediante la pressione delle dita, la lunghezza della parte vibrante. È indubitato che « il violino vince tutti gli altri strumenti a corda per la sonorità e per la potenza mista a nobiltà ed eleganza. La sua sonorità a volte stridula e cavalleresca, a volte dolce e melanconica, conferisce al violino uno dei primi posti fra gli strumenti musicali » (Amaduzzi, *Fisica*, Ed. Zanichelli).

Il violino è il primo membro d'una famiglia comprendente la *viola*, il *violoncello*, il *contrabasso*, che col violino formano un complesso detto ordinariamente *quartetto;*

c) il *mandolino* ha le corde che vengono eccitate con una linguetta di corno o di avorio; nella *chitarra* le corde son pizzicate con le dita. L'*arpa* ha 46 corde e si usa più spesso come strumento *a solo*; i suoni hanno una profonda dolcezza.

Gli *strumenti a fiato* comprendono:

a) il *flauto* e l'*ottavino*, aventi l'imboccatura detta appunto a *flauto*, come si verifica nei tubi dell'organo, ma formata in parte dalle labbra del suonatore;

b) l'*oboe*, il *clarinetto* e il *fagotto*, con l'imboccatura a *linguetta*, oppure a *piva*, che consiste in una stretta fenditura le cui labbra entrano in vibrazione come una linguetta. Tutti questi strumenti, come anche il flauto e l'ottavino, sono formati di un tubo sonoro di varia forma, nel quale a convenienti distanze sono praticati dei fori che permettono, chiudendoli o aprendoli con le dita o con apposite *chiavi*, di ottenere diversi suoni;

c) gli *ottoni* (strumenti di ottone) possono dirsi a linguetta, ma questa è formata dalle labbra stesse del suonatore che adattate contro l'estremo leggermente svasato dello strumento, devono assumere uno speciale atteggiamento. Per ottenere i vari suoni si muovono certi tasti che mettono in comunicazione col tubo principale dei tratti di tubo che ne variano la lunghezza;

d) l'*organo* è il più perfetto degli strumenti. In esso i suoni sono prodotti da moltissimi tubi sonori, di legno, di metallo con imboccature a flauto e a linguetta. I tubi sono disposti in modo che muovendo certi congegni, detti *registri*, si possono mettere in comunicazione con la tastiera l'una o l'altra categoria di tubi, in modo da ottenere i diversi timbri.

180. Cenno sulla riproduzione dei suoni. — La riproduzione dei suoni viene eseguita particolarmente con due metodi: il metodo, diremo così, *meccanico* e il metodo *ottico*. Quest'ultimo è oggi esclusivamente adoperato nel Cinema sonoro, dove si richiede un assoluto sincronismo fra il movimento delle immagini proiettate e i suoni e le voci relative, ma esso richiede l'applicazione di fenomeni elettrici abbastanza complessi.. Ci limitiamo perciò a un breve cenno del primo.

La riproduzione meccanica dei suoni è fatta col *fonografo*. Riportiamoci al cilindro affumicato che ci ha servito per l'iscrizione della curva di vibrazione di un corpo sonoro; l'Edison ebbe infatti la felice idea di sostituire al cilindro affumicato un cilindro di sostanza plastica, contro il quale poggiava la punta scrivente. La parte essenziale è una membrana

elastica *aa* di vetro assai sottile (fig. 349) che chiude il fondo di una cavità svasata *B* davanti alla quale si produce il suono. La membrana vibra all'unisono coi movimenti oscillatori trasmessile dall'aria.

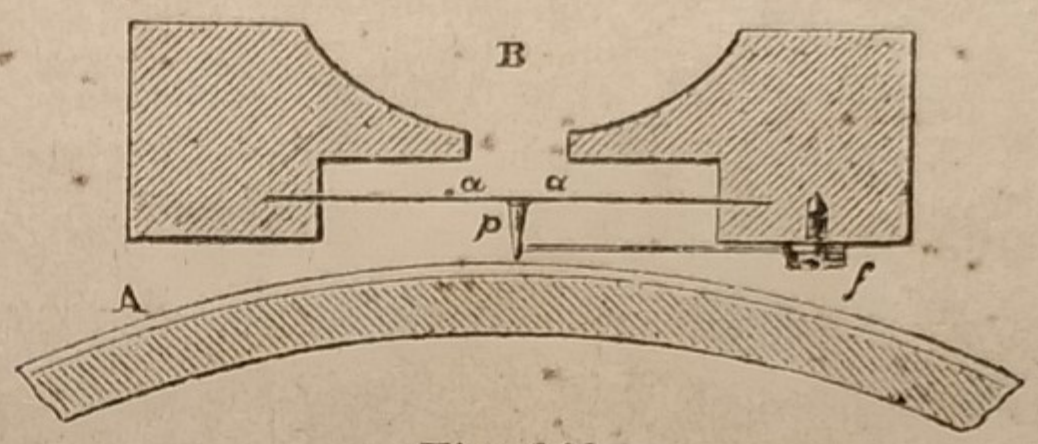

Fig. 349.

Una punta *p*, fissata perpendicolarmente alla membrana appoggia col suo estremo libero sopra un cilindro di cera *A* levigatissimo. Questo cilindro è montato meccanicamente come il cilindro affumicato della figura 319. In tal modo la punta, finchè è immobile traccia nella cera un leggero solco elicoidale di profondità costante. Se la membrana vibra, la punta iscrive nella cera delle sinuosità che hanno profondità, numero e forma corrispondenti all'intensità, all'altezza e al timbro del suono emesso. Così si ottiene un *fonogramma*, che può esser tolto e conservato.

Fig. 350.

Per la riproduzione dei suoni iscritti, si rimette a posto il fonogramma e si sostituisce la scatola scrivente, con un'altra *ripetitrice*, che differisce dalla prima solo per il fatto che la sua punta è alquanto smussata per non alterare il solco già inciso. Il cilindro è rimesso in moto nello stesso senso e con la stessa velocità di prima, di modo che la punta, seguendo il fondo del solco tracciato, è obbligata a eseguire con tutte le particolarità, i movimenti compiuti dalla punta scrivente. Questi movimenti sono comunicati alla membrana, che così

ripete le vibrazioni del tracciato e riproduce esattamente i suoni primitivi. Rinforzati da una tromba acustica (167), i suoni possono essere intesi da un numeroso uditorio. Lo stesso fonogramma può essere utilizzato per successive riproduzioni.

Tale apparecchio è stato in seguito felicemente modificato nel *grammofono* (fig. 350). I fonogrammi non sono più fatti con cilindri di cera che si guasta facilmente, ma con dischi di una sostanza piuttosto complessa, dove le vibrazioni sono riprodotte lungo un solco a spirale piana, restringentesi verso il centro. Il disco viene montato sopra una piattaforma orizzontale, mossa da un meccanismo d'orologeria, con velocità regolabile. Una membrana elastica, portata da una scatola cilindrica, è fatta vibrare da una piccola punta di ferro colla quale è unita. La scatola è in comunicazione colla tromba per mezzo di un tubo girevole attorno a un asse verticale, di guisa che la punta durante la rotazione del disco ne può seguire il solco tracciato.

Ma anche qui il primo fonogramma viene iscritto sopra un disco di sostanza plastica; da questo si ottiene un disco di metallo nel quale alle cavità del solco del disco di cera corrispondono dei rilievi e viceversa, e col disco metallico, che è, si può dire, la negativa del disco primitivo, si stampano per pressione i dischi comuni nei quali cavità e rilievi ritornano nel senso del disco primitivo.

INDICE

INTRODUZIONE

Introduzione . . . . . *Pag.* 1

1. Esempi di fenomeni fisici. - 2. Rappresentazioni grafiche. - 3. Stati di aggregazione. - 4. Proprietà generali della materia: estensione, divisibilità, compressibilità, porosità, elasticità, dilatabilità.

MECCANICA

Cinematica . . . . . *Pag.* 12

5. Traiettoria. - Direzione del moto. - 6. Moto uniforme e vario. - Moto uniformemente vario. - 7. Moto periodico (circolare, oscillatorio). - 8. Composizione dei movimenti.

Statica . . . . . » 25

9. Concetto di forza; equilibrio; unità statica di forza. - 10. Equilibrio di forze complanari o comunque concorrenti. - 11. Decomposizione di una forza in due complanari. - 12 Equilibrio di corpi aventi un punto o un asse fisso. - 13. Coppia. - 14. Equilibrio di forze comunque disposte. - 15. Gravità; baricentro; equilibrio dei gravi. - 16. Equilibrio statico di meccanismi semplici: leva, puleggia, asse nella ruota, piano inclinato, cuneo, vite. - 17. Applicazione delle macchine semplici.

Dinamica . . . . . *Pag.* 66

18. Inerzia. - Proporzionalità fra forza ed accelerazione. Massa. - Unità dinamica di forza. - 19. Impulso e quantità di moto. - 20. Azione e reazione. - 21. Moto dei gravi liberi e sul piano inclinato. - 22. Pendolo semplice. - 23. Pendolo composto e geodetico; misura di *g*. - 24. Applicazioni del pendolo. - 25. Dinamica del moto circolare uniforme. - Forza centripeta e centrifuga. - 26. Effetti della forza centrifuga e applicazioni.

Lavoro - Energia - Potenza . . . . . » 93

27. Lavoro ed energia. - Potenza. - 28. Lavoro motore e resistente. - 29. Lavoro d'una forza quando lo spostamento non avviene nella sua direzione. - 30. Unità di lavoro e di potenza. - 31. Energia di moto e di posizione. - 32. Equilibrio dinamico nelle macchine. - 33. Resistenze passive.

Proprietà principali dei solidi . . . . . » 104

34. Tenacità, durezza. - 35. Elasticità; isterèsi elastica.

Meccanica dei liquidi . . . . . » 109

36. Proprietà principali dei liquidi. - Pressione. - 37. Trasmissione della pressione nei liquidi. - 38. Torchio idraulico. - 39. Pressioni nei liquidi destate dalla gravità. - 40. Vasi comunicanti e applicazioni. - 41. Principio di Archimede. - 42. Equilibrio dei galleggianti. - 43. Navi e battelli sommergibili.

Applicazioni dei principî dell'idrostatica per la misura della densità . . . . . » 133

44. Densità e peso specifico. - 45. Densità delle sostanze più comuni.

Meccanica dei gas . . . . . » 139

46. Proprietà principali dei gas. - 47. Pressione atmosferica e suoi effetti. - 48. - Principio di Archimede nei gas. - 49. Barometri. - 50. Usi del barometro. - 51. Legge di Boyle e Mariotte. - 52. Misura della pressione dei fluidi (manometri,

vacuometri). - 53. Moto dei fluidi. - 54. Macchina pneumatica. - 55. Trombe. - 56. Applicazione delle macchine pneumatiche e dei compressori. - 57. Pompe idrauliche. - 58. Teorema di Torricelli sull'efflusso dei liquidi. - 59. Cenni sulle misure di velocità e di portata. - 60. Moto di un solido in un fluido (navi, dirigibili, velivoli).

Azioni molecolari . . . . . *Pag.* 185

61. Coesione e adesione. - 62. Adesione fra solidi, fra solidi e gas e fra solidi e liquidi. - 63. Diffusione, osmosi, dialisi. - 64. Pressione osmotica. - 65. Fenomeni di capillarità. - 66. Viscosità.

TERMOLOGIA

Termologia . . . . . *Pag.* 198

67. Sensazioni termiche ed effetti del calore.

Misura delle temperature . . . . . » 198

68. Calore e temperatura. - 69. Termometri e scale termometriche. - 70. Requisiti di un buon termometro. - 71. Termometri ad alcool, a toluene, ecc. - 72. Termometri a massima e a minima.

Dilatazione . . . . . » 206

73. Dilatazione termica dei solidi. - Dilatazione lineare. - 74. Dilatazione cubica. - 75. Variazione della densità con la temperatura. - 76. Dilatazione dei liquidi. - 77. Capacità di un vaso a diverse temperature. - 78. Dilatazione dei liquidi diversi dal mercurio. - 79. Dilatazione dell'acqua. - 80. Dilatazione dei gas. - 81. Equazione caratteristica dei gas. - 82. Temperatura assoluta. - 83. Teoria cinetica dei gas. - Moti browniani.

Calorimetria . . . . . » 218

84. Quantità di calore e sua misura. - 85. Calore specifico. - 86. Risultati generali relativi ai calori specifici dei solidi e dei liquidi. - 87. Alcuni dati numerici. - 88. Importanza dell'elevato calore specifico dell'acqua.

Propagazione del calore . . . . . *Pag.* 222

89. Conduttività. - 90. Diversa conduttività dei metalli. - 91. Proprietà delle reti metalliche. - Lampada di sicurezza. - 92. Conduttività assoluta o interna. - 93. Calorifughi. - 94. Irradiazione. - 95. Convezione o trasporto del calore. - 96. Venti.

Cambiamenti di stato . . . . . » 229

97. Fusione e sue leggi. - 98. Cambiamento di volume durante la fusione. - 99. Variazione del punto di fusione colla pressione. - 100. Solidificazione e surfusione. - 101. Fusione delle leghe. - 102. Applicazione della fusione e della solidificazione. - 103. Evaporazione. - 104. Tensione massima del vapore d'acqua e di altri liquidi. - 105. Ebollizione. - 106. Soprariscaldamento. - 107. Influenza della pressione sulla temperatura di ebollizione. - 108. Distillazione semplice e frazionata. - 109. Liquefazione. - Temperatura critica. - 110. Liquefazione dei gas facilmente liquefacibili. - 111. Liquefazione dei gas difficilmente liquefacibili. - Metodi per ottenere le basse temperature. - 112. Liquefazione dell'aria. - 113. Conservazione dell'aria liquida: vasi di Dewar. - 114. Proprietà e applicazioni dell'aria liquida. - 115. Calore di trasformazione. - 116. Calore di fusione e di vaporizzazione.

Igrometria . . . . . » 256

117. Umidità dell'aria. - 118. Igrometro chimico. - 119. Igrometri a condensazione. - 120. Psicrometro. - 121. Igroscopi.

Cenni di Termodinamica . . . . . » 261

122. Trasformazione reciproca del lavoro e del calore; primo principio della Termodinamica. - 123. Equivalente meccanico della caloria. - 124. Principio della conservazione dell'energia. - 125. Secondo principio della Termodinamica. - 126. Motori termici. - 127. Macchine a vapore. - 128. Cilindro. - 129. Organi regolatori. - 130. Condensatore. - 131. Cenno sulle turbine a vapore o turbo-motori. - 132. Rendimento d'una macchina a vapore. - 133. Motori a scoppio. - 134. Macchine refrigeranti.

Riscaldamento e ventilazione degli ambienti abitati e industriali . . . . . » 279

135. Apparecchi di riscaldamento. - 136. Ventilazione.

BREVI NOZIONI DI METEOROLOGIA

Meteorologia generale . . . . . *Pag.* 285

137. L'atmosfera terrestre. - 138. Temperatura dell'aria. - 139. Variazione diurna della temperatura. - 140. Cause che modificano l'andamento diurno della temperatura. - 141. Media diurna. - 142. Variazione annua della temperatura.

Meteore acquee . . . . . » 293

143. Nubi e nebbie. - 144. Varie forme di nubi. - 145. Pioggia. - 146. Neve e grandine. - 147. Rugiada e brina.

La pressione atmosferica . . . . . » 304

148. Pressione atmosferica. - 149. Riduzione del barometro a zero. - 150. Riduzione del barometro al livello del mare.

Movimenti dell'atmosfera . . . . . » 306

151. Venti. - 152. Cause dei venti. - 153. Circolazione generale dell'atmosfera: alisei e contro-alisei. - 154. Monsoni. - 155. Venti periodici: brezze. - 156. Isobare. - Ciclone ed anticiclone. - Gradiente barometrico. - 157. Previsione del tempo.

ACUSTICA

Acustica . . . . . *Pag.* 315

158. Vibrazione dei corpi elastici. - 159. Propagazione dei moti vibratori - Velocità di trasmissione. - 160. Meccanismo di propagazione. - 161. Suoni puri. - 162. Frequenza e sua misura. - 163. Limite dei suoni percettibili. - 164. Corista cronografico. - 165. Lunghezza d'onda. - 166. Intensità. - 167. Tubi, cornetti acustici, portavoce. - 168. Suoni complessi; loro timbro; rumori. - 169. Riflessione del suono. - 170. Specchi coniugati. - 171. Eco. - 172. Percezione dei suoni; l'orecchio. - 173. Fenomeni di risonanza. - 174. Fenomeni d'interferenza - Battimenti. - 175. Vibrazioni delle corde. - 176. Vibrazioni dei tubi. - - 177. Intervalli musicali. - 178. Scale musicali. - 179. Tipi principali di strumenti musicali. - 180. Cenno sulla riproduzione dei suoni.

Torino - Milano - Firenze — G. B. PARAVIA & C. — Roma Napoli - Palermo

LEANDRO SEGALIN

FISICA SPERIMENTALE

(Nuove edizioni conformi ai programmi 15 Maggio 1933-XI)

AD USO DELL'ISTITUTO TECNICO PER GEOMETRI

Volume primo . . . . . L. 13,50
» secondo . . . . . » —

AD USO DELL'ISTITUTO TECNICO AGRARIO (Corso ordinario)

Volume primo . . . . . » 12 —
» secondo . . . . . » —

AD USO DELL'ISTITUTO TECNICO INDUSTRIALE (Corso ordinario)

Volume primo . . . . . » 10,50
» secondo . . . . . » —

AD USO DELL'ISTITUTO TECNICO COMMERCIALE

Volume unico . . . . . » —

AD USO DEI LICEI CLASSICI E SCIENTIFICI

Volume primo . . . . . » —
» secondo . . . . . » —

Prezzo: L. 14 — (in Torino) **L. 13,50**